



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Systém pro měření parametrů magnetických materiálů

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Lukáš Eichler**

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Prototype of Single Sheet Tester

Master thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 3906T001 – Mechatronics
Author: **Bc. Lukáš Eichler**
Supervisor: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Eichler**
Osobní číslo: **M16000144**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**
Název tématu: **Systém pro měření parametrů magnetických materiálů**
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

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

1. Seznamte se s principem měření magnetických vlastností SST testerem. Provedte rešerši používaných modifikací.
2. Navrhněte prototyp testeru. Navrhněte magnetický obvod, konstrukci cívek a elektroniku testeru.
3. Zhotovte prototyp. S jeho pomocí proveďte měření na dostupných materiálech.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: 40–50 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] DUFEK, Milan, Jaroslav HRABÁK a Zdeněk TRNKA. Magnetická měření. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [2] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. Magnetické prvky a měření. Vyd. 3. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03970-0.
- [3] TUMAŇSKI, Sawomir. Handbook of magnetic measurements. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4398-2951-6.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant diplomové práce:

Ing. Martin Černík, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 14. května 2018

prof. Ing. Zdeněk Pliva, Ph.D.
děkan



doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 14. 5. 2018

Podpis: Eichler

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Miroslavu Novákovi Ph.D. za velmi cenné rady a velkou pomoc při řešení práce.



Abstrakt

Tato Diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí systému na měření magnetických vlastností magneticky měkkých materiálů pro výrobu el. strojů – elektrotechnických plechů. V praxi se nejčastěji používají: Epsteinův přístroj a Single Sheet Tester (SST), kterým se dále zabývám. Vypracoval jsem rešerši SST, ve které jsou uvedeny rozměry a další parametry jednotlivých SST z dostupných publikací. Z této rešerše vychází praktická část návrhu. Realizovaný prototyp je složen ze dvou feritových jader tvaru U, mezi nimiž je vložen páskový vzorek. Na jádrech jsou umístěny magnetizační cívky, každá má 180 závitů. Snímací cívky měrného toku a intenzity magnetického pole, obě o 65 závitů, jsou umístěny na vzorku. Pro napájení magnetizační cívky byl navržen výkonový zesilovač se stejnosměrnou vazbou. Zesilovač s výkonovým operačním zesilovačem OPA549 je schopen dodávat dostatečný proud na magnetizaci až 5 A. Zesilovač je napájen symetrickým napájením ze dvou spínaných zdrojů LRS-100-24. Výstupní napětí zdrojů obsahuje vysokofrekvenční rušení, proto je v práci popsán návrh a realizace vysokofrekvenčního filtru napájení. Celá sestava byla otestována změřením několika vzorků materiálu.

Klíčová slova

Magnetické vlastnosti feromagnetických materiálů, Single Sheet Tester, SST, Výkonový zesilovač, Vysokofrekvenční filtr, OPA549.



Abstract

This thesis deals with the design and construction of a system for measuring the magnetic properties of magnetically soft materials for the production of el. machines - electrotechnical sheets. In practice, the most commonly used are the Epstein device and the Single Sheet Tester (SST), which I deal with later. I have made a SST research, which lists the dimensions and other parameters of each SST from available publications. This is a practical part of the proposal. The prototype is composed of two U-shaped ferrite cores, a sample is placed between these cores. The cores are equipped with magnetizing coil, each coil have 180 turns. Sensing coils of specific flux and intensity of magnetic field are placed on the sample. A power amplifier with a DC link was designed to power the magnetizing coil. The amplifier with power opamp OPA549 is able to supply enough current for magnetization up to 5 A. The amplifier is powered by symmetric power supply from two switched LRS-100-24 sources. The output voltage of the sources contains high-frequency noise, so the design and implementation of the high-frequency filter is described. The entire assembly was tested by measuring several samples of the material.

Key words

Magnetic Properties of Ferromagnetic Materials, Single Sheet Tester, SST, Power Amplifier, High Frequency Filter, OPA549.



Obsah

Úvod.....	13
1. Teoretická část	14
1.1. Měřené vlastnosti feromagnetických materiálů	14
1.1.1 Magnetizační křivka.....	14
1.1.2 Křivka prvotní magnetizace	15
1.1.3 Koercitivita a remanence.....	15
1.1.4 Maximální energetický součin	15
1.1.5 Ztráty v magnetickém obvodu	15
1.1.6 Curieova teplota	16
1.1.7 Magnetostrikce.....	16
1.1.8 Anizotropie.....	16
1.2. Single sheet tester –SST.....	17
1.3. Epsteinův přístroj	19
1.4. Průzkum stavu techniky	20
2. Návrh měřicího systému	24
2.1. Koncepce měřicího systému	24
2.2. Návrh stojanu SST a cívek.....	25
2.2.1 Stojan SST.....	25
2.2.2 Magnetizační cívky	26
2.2.3 Snímací cívky.....	27
2.2.4 Sestavení SST.....	29
2.3 Výpočet intenzity magnetického pole.....	29
2.4 Napájecí zdroj	29
2.5 Výkonový zesilovač.....	30
2.5.1 Výběr operačního zesilovače	30
2.5.2 Operační zesilovač OPA 549	30
2.5.3 Návrh zapojení zesilovače.....	32



2.5.4	Plošný spoj zesilovače.....	33
2.5.5	Osazení a oživení plošného spoje zesilovače.....	34
2.6	Filtr napětí.....	34
2.6.1	Návrh filtru napětí.....	35
2.6.2	Osazení a oživení plošného spoje.....	36
2.7	Kompletace systému	37
3	Měření na SST	39
3.1	Vzorek č. 1 měřen ve směru snadného magnetování.....	40
3.2	Vzorek č. 2 měřen ve směru snadného magnetování.....	41
3.3	Vzorek č. 3 měřen ve směru nesnadného magnetování	42
	Závěr	44
	Literatura.....	45
	Přílohy.....	48



Seznam ilustrací

Obrázek 1 Magnetizační křivka	14
Obrázek 2 Konstrukce SST	17
Obrázek 3 Schéma zapojení SST	18
Obrázek 4 Epsteinův rám	19
Obrázek 5 Rozměry jha	21
Obrázek 6 Konstrukce SST	24
Obrázek 7 Elektrické schéma SST	24
Obrázek 8 Návrh stojanu SST	25
Obrázek 9 Držák magnetizační cívky	26
Obrázek 10 Držák magnetizační cívky	26
Obrázek 11 Navinuté magnetizační cívky	27
Obrázek 12 Držák snímacích cívek	27
Obrázek 13 H-cívka	28
Obrázek 14 B-cívka	28
Obrázek 15 Snímací cívky	28
Obrázek 16 Single Sheet Tester	29
Obrázek 17 OPA549 [22]	31
Obrázek 18 Schéma zapojení výkonového zesilovače	32
Obrázek 19 Plošný spoj výkonového zesilovače	33
Obrázek 20 Osazený plošný spoj	34
Obrázek 21 Závislost útlumu šumu z napájecího zdroje na frekvenci šumu [22]	35
Obrázek 22 Schéma filtru	35
Obrázek 23 Plošný spoj filtru	36
Obrázek 24 Osazený plošný spoj	36
Obrázek 25 Průběhy napětí na filtru	37
Obrázek 26 Schéma propojení komponent	37
Obrázek 27 Rozložení komponent v krabici	38
Obrázek 28 Přední panel	38
Obrázek 29 Měřicí karta	39
Obrázek 30 Schéma zapojení měření	39
Obrázek 31 Časový průběh signálů na vzorku č. 1 je napětí na H-cívce	40
Obrázek 32 Hysterezní smyčka vzorku č. 1	41
Obrázek 33 Časový průběh signálů na vzorku č. 2	41
Obrázek 34 Hysterezní smyčka vzorku č. 2	42



Obrázek 35 Časový průběh signálů na vzorku č. 3.....	43
Obrázek 36 hysterezní smyčka vzorku č. 3.....	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 Rešerše.....	22
Tabulka 2 Rešerše.....	23
Tabulka 3 Operační zesilovače s vysokým výstupním proudem.....	30
Tabulka 4 Nastavené proudového limitu.....	31



Seznam symbolů a zkratek

SST	Single sheet tester
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
PVC	Polyvinylchlorid
OZ	Operační zesilovač
SMD	Součástka určená pro povrchovou montáž
THT	Součástka s drátovými vývody
BNC	Konektor pro stíněný kabel
H [A/m]	Intenzita magnetického pole
B [T]	Magnetická indukce
H_c [A/m]	Koercitivní síla
B_r [T]	Remanentní magnetizace
$(BH)_{\max}$ [J/m ³]	Maximální energetický součin
P_h [W]	Hysterezní ztráta
$B_{\max}$ [T]	Maximální indukce
f [Hz]	Frekvence
P_e [W]	Ztráty vířivými proudy
r [m]	Tloušťka materiálu
ρ [Kg/m ³]	Hustota
V [m ³]	Objem
T_c [c°]	Curieova teplota
N_H	Počet závitů H-cívky
μ_0 [H/m]	Permitivita vakua
S_H [m ²]	Plocha cívky
$v(t)$ [V]	Průběh napětí na H-cívce
U_{sec} [V]	Průběh napětí na B-cívce
$H_{\max}$ [A/m]	Maximální intenzita magnetického pole
$H_{\min}$ [A/m]	Minimální intenzita magnetického pole



Úvod

Měření vlastností magneticky měkkých materiálů je využíváno ke zlepšování technologie výroby těchto materiálů. Změnou technologie výroby lze dosáhnout lepších magnetických vlastností materiálů využívaných k výrobě elektrických motorů a transformátorů. Tyto vlastnosti je též nutné měřit pro výpočty při návrhu strojů. V neposlední řadě se těchto měření využívá i při kontrole kvality materiálu dodaného od dodavatele.

Pro měření těchto vlastností byly zavedeny metody měření. Tyto způsoby měření jsou normalizovány. V současné době se nejčastěji využívá k měření Epsteinův přístroj nebo Single sheet tester (SST), a také jeho varianty jako je rotační SST. Konstrukce a měření SST testeru je popsáno v normách IEC 60404-03 a IEC 60404-02.

Cílem práce je vyhledat v dostupných literárních pramenech principy měření magnetických vlastností pomocí SST a provést rešerši používaných modifikací. Z této rešerše se inspirovat k vlastnímu návrhu modifikace normalizovaného SST.

Modifikace SST spočívá ve změně rozměrů jader, v umístění magnetizačních cívek nebo v počtu závitů cívek. Magnetizační cívka je umístěna buď na jádru, nebo na vzorku. Počet závitů je dán velikostí magnetické indukce ve vzorku. Tyto změny je nutno v návrhu zohlednit a zavést korekci oproti normalizovanému SST.

Návrh a realizace systému lze rozdělit do dvou částí. V první části se zabývám konstrukcí SST. SST se skládá ze dvou jader tvaru U. Mezi tato jádra je vložen vzorek materiálu. Na jádrech jsou navinuty magnetizační cívky. Na vzorku jsou dvě snímací cívky. První, B-cívka, slouží k měření magnetické indukce. Druhá, H-cívka, slouží k měření intenzity magnetického pole. Magnetizační cívka je napájena z výkonového zesilovače. Napětí indukované v měřicích cívkách je snímáno měřicí kartou.

Druhou částí je již zmiňovaný výkonový zesilovač. Zesilovač musí být schopen dodávat proud, který vytvoří vysokou intenzitu magnetického pole. Zesilovač je napájen ze spínaných zdrojů. Výstupní napětí z tohoto zdroje je zvlněné spínáním, které by se mohlo projevit na výstupu výkonového zesilovače, proto je mezi zesilovač a napájení vložen filtr napětí. Tento filtr odstraňuje vysokofrekvenční rušení.

Po sestavení systému proběhla měření několika vzorků, na kterém se ověřila funkčnost celého systému.



1. Teoretická část

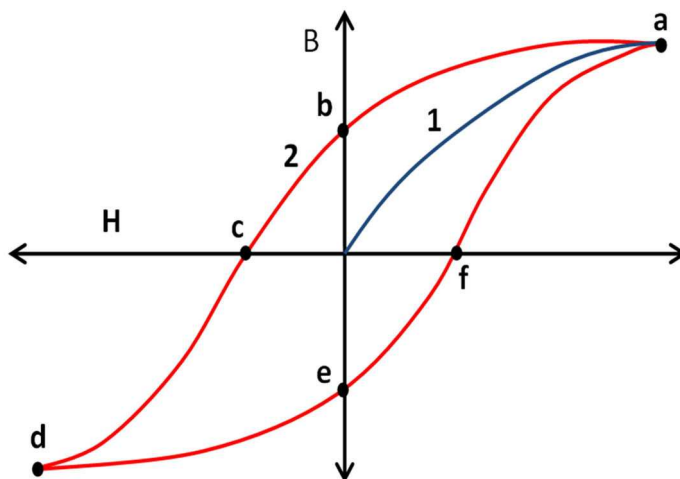
V této části se zabývám teoretickým rozбором problematiky. Popisuji několik základních měřených vlastností magneticky měkkých materiálů. Uvádím, jaké se používají metody na měření těchto parametrů. Nejběžnějšími metodami jsou Epsteinův přístroj a Single sheet tester. Na konci je porovnání parametrů single sheet testerů z jiných článků.

1.1. Měření vlastností feromagnetických materiálů

V této podkapitole jsou vybrané základní měřené vlastnosti magnetických materiálů. Popisuji zde, co je to magnetizační křivka a křivka prvotní magnetizace a vlastnosti, jaké z nich lze vyčíst, jako jsou koercitivita, remanence a další.

1.1.1 Magnetizační křivka

Magnetizační křivka (hysterezní smyčka) feromagnetického materiálu je uzavřená křivka magnetování, která zobrazuje závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H . Pro získání magnetizační křivky se vloží feromagnetický materiál do magnetického pole. Intenzita magnetického pole je plynule měněna od nuly do $+H$, čímž vznikne křivka prvotní magnetizace. Poté je intenzita plynule měněna až na $-H$ a zpět na $+H$, tím vznikne celá magnetizační křivka. Změna intenzity musí být tak pomalá, aby nedocházelo ke ztrátám vířivými proudy. V případě, že tyto ztráty ovlivní měřenou křivku, nazýváme tuto křivku dynamickou.



Obrázek 1 Magnetizační křivka

Na obrázku 1 je zobrazena hysterezní smyčka i s prvotní magnetizací. Hysterezní smyčka je označena číslem 2 a červenou barvou, křivka prvotní magnetizace je označena číslem 1 a modrou barvou.



Průběh magnetizační křivky je popsán písmeny *a* až *f*. Po prvotní magnetizaci je v bodě *a* materiál nasycen. Při snižování intenzity magnetického pole klesá i magnetická indukce *B* až do bodu *b*. V tomto bodu nepůsobí na materiál žádné magnetické pole, ale magnetická indukce není nulová – to znamená, že materiál zůstal částečně zorientovaný. Tato indukce se nazývá remanentní. Při zvyšování intenzity magnetického pole do záporných hodnot prochází křivka bodem *c*. V tomto bodě na látku působí magnetické pole, ale magnetická indukce v materiálu je nulová – materiál má ale stále jistou polarizaci *J*. Intenzitu magnetického pole potřebnou pro odstranění magnetické indukce v materiálu nazýváme koercitivní síla H_c . Dále při zvyšování intenzity do záporných hodnot jsou v bodě *d* magnetické domény v materiálu zmagnetizovány obráceným směrem než v bodě *a*. Dále je intenzita magnetického pole měněna ze záporných do kladných hodnot. Tvar křivky odpovídá části popsané výše. Bod *e* na křivce odpovídá bodu *b* a bod *f* odpovídá bodu *c*.

1.1.2 Křivka prvotní magnetizace

Tato křivka je vyznačena na obrázku 1 modrou barvou a je označena číslem 1. Křivka je získána z naprosto odmagnetovaného materiálu, který je vložen do postupně se zvětšujícího magnetického pole. Změna intenzity magnetického pole musí být jen jedním směrem, aby nedošlo ke znehodnocení křivky.

1.1.3 Koercitivita a remanence

Tyto dvě vlastnosti materiálu jsou zakresleny v obrázku 1. Koercitivita H_c [A/m] je na smyčce označena bodem *c*. Tato vlastnost udává, jak velká intenzita magnetického pole je třeba k dosažení nulové magnetické indukce *B* v materiálu, který byl již zmagnetizován. Remanence B_r [T] je na smyčce označena bodem *b*. Tato vlastnost udává, jak velká magnetická indukce v materiálu zůstane po odstranění vnějšího magnetického pole *H*.

1.1.4 Maximální energetický součin

Jedná se o vlastnost feromagnetického materiálu, která udává maximální hustotu magnetické energie uložené ve zmagnetizovaném materiálu. Měříme ji zpravidla u magneticky tvrdých materiálů. Veličina bývá označována $(BH)_{\max}$ a jednotkou je J/m³. Jedná se o nejvyšší možnou hodnotu součinu magnetické indukce *B* a intenzity magnetického pole *H* v oblasti demagnetizační křivky, která se nachází v druhém kvadrantu na obrázku 1. Čím vyšší je hodnota $(BH)_{\max}$, tím menší mohou být rozměry magnetu pro stejnou aplikaci.

1.1.5 Ztráty v magnetickém obvodu

Energie, která se ztrácí v magnetickém obvodu, se mění na teplo. Ztráty v magnetickém obvodu dělíme do dvou kategorií. První kategorií



jsou ztráty hysterezní P_h . Tyto ztráty závisí na ploše hysterezní smyčky. Pro výpočet těchto ztrát platí vztah (1), kde f je frekvence budicího proudu a B_{max} je maximální indukce.

$$P_h = f \cdot B_{max} \quad (1)$$

Druhou kategorií jsou ztráty vířivými proudy P_e . Tyto ztráty vznikají ve feromagnetickém materiálu, protože je elektricky vodivý. Změna magnetického pole v okolí materiálu vyvolá proud, který se snaží působit proti změně. Pro tyto ztráty platí vztah (2), kde f je frekvence budicího proudu, B_{max} je maximální indukce, r je tloušťka materiálu a ρ je rezistivita materiálu.

$$P_e = \frac{(f \cdot B_{max} \cdot r)^2}{\rho} \quad (2)$$

Další důležitou vlastností materiálu jsou měrné ztráty. Měrné ztráty vycházejí z celkových ztrát a udávají, jaká energie je spotřebována na magnetizaci 1 Kg materiálu při sinusové magnetické indukci. Pro tyto ztráty platí vztah (3), kde P_h jsou hysterezní ztráty, P_e jsou ztráty vířivými proudy, V je objem feromagnetika a ρ je hustota feromagnetika.

$$p = \frac{P_h + P_e}{V \cdot \rho} \quad (3)$$

1.1.6 Curieova teplota

Jedná se o charakteristickou vlastnost materiálu označovanou T_c . Při překročení Curieovy teploty ztrácí zmagnetizovaná feromagnetická látka svoje magnetické vlastnosti – magnetické dipóly přestávají být orientovány stejným směrem. K této změně dochází skokově. Po vychladnutí nevykazuje materiál žádné magnetické vlastnosti. Curieova teplota závisí na složení materiálu. Například u železa je to 768 °C. V případě, že známe složení materiálu, není problém tuto teplotu s dostatečnou přesností vypočítat. Pracovní teplota magnetu by pak neměla překročit 40 procent Curieovy teploty.

1.1.7 Magnetostrikce

Tato vlastnost udává, o kolik se prodlouží nebo zkrátí feromagnetický materiál, který je vložen do magnetického pole. Součinitel magnetostrikce udává rozdíl rozměrů materiálu, na který nepůsobí žádné magnetické pole a materiálu, který je v magnetickém poli. Magnetostrikce může být jak délková, tak objemová. Tato vlastnost se využívá u aktuátorů a snímačů.

1.1.8 Anizotropie

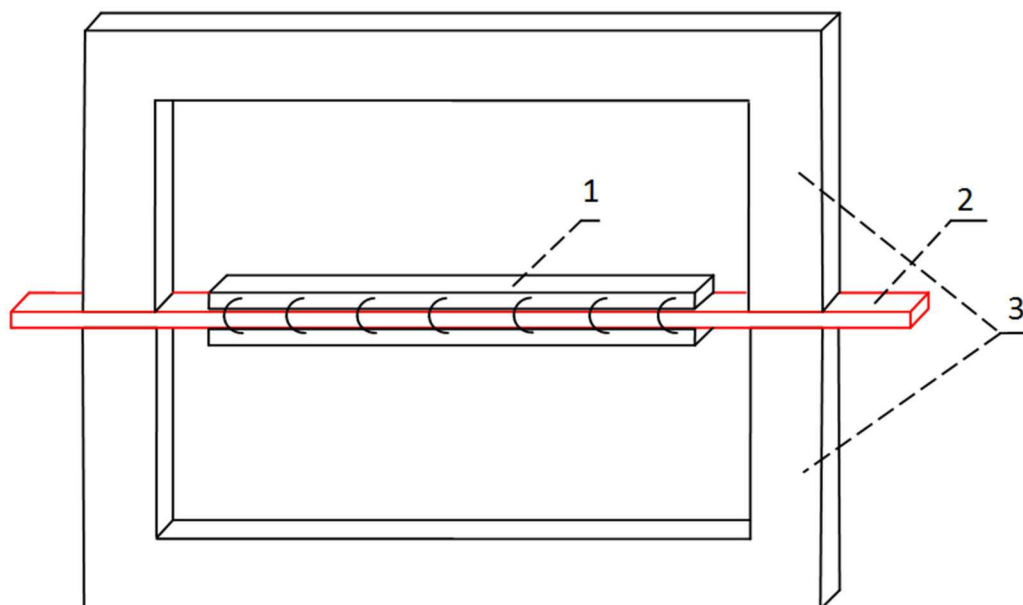
Magnetická anizotropie je vlastnost feromagnetické látky, která udává závislost magnetických vlastností materiálu v závislosti na směru magnetování. Anizotropní materiál má tzv. směr snadného a nesnadného magnetování. Ve směru snadného magnetování



má materiál vyšší permeabilitu, v nesnadném je permeabilita nižší. Rozdíl magnetických vlastností mezi jednotlivými směry může být vyvolán různými druhy magnetické anizotropie: magnetokrystalickou, magnetostatickou, indukovanou a magnetoelastickou.

1.2. Single sheet tester –SST

Jedná se o systém, který měří magnetické vlastnosti materiálu. Konstrukce tohoto měřicího systému je normalizována normou IEC 60404-03 a je znázorněna na obrázku 2.

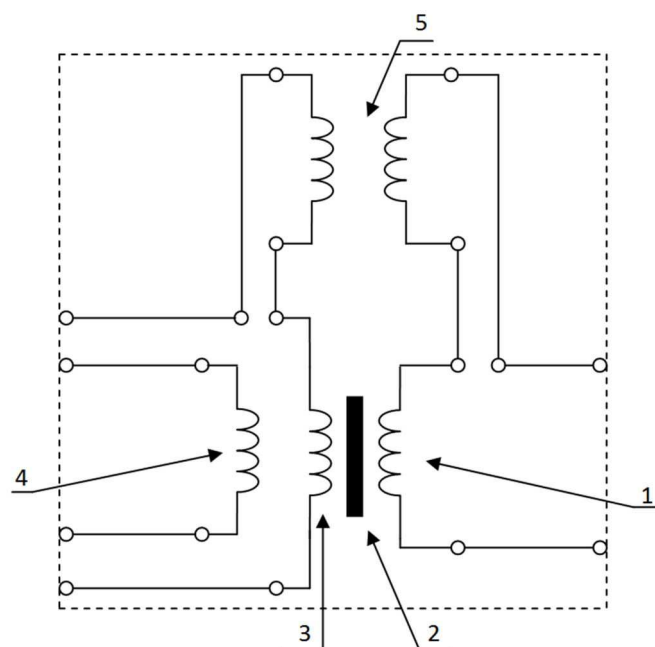


Obrázek 2 Konstrukce SST

U tohoto měřicího systému je testovaný vzorek (označen 2) z magnetického materiálu vložen do dvou vinutí (označen 1). Jedno z těchto vinutí je magnetizační (primární) a druhé je snímací (sekundární). Magnetický tok uzavírají dvě jádra (označen 3) ve tvaru U. Pro snížení efektu vířivých proudů jsou tato jádra (jho) tvořena z vodivě oddělených plechů z magneticky měkké oceli. Vzduchová mezera mezi jádrem a vzorkem by neměla překročit 0,005 mm, aby byl magnetický obvod vhodně uzavřen.

Vzorek by měl mít délku 500 mm a šířku co největší, ale nesmí být širší než jho. Ve standardu je uváděna šířka jha 500 mm, ale v modifikacích se používají i jiné rozměry. Hlavní podmínka při změně rozměrů jha je, že výsledek musí být kompatibilní s výsledkem ze standardního SST. Vzorek ve standardním SST má čtvercové rozměry 500x500 mm, což znamená, že může být pootočen o 90° a mohou být změřeny jeho vlastnosti v obou směrech na jednom vzorku.





Obrázek 3 Schéma zapojení SST

Na obrázku 3 vidíme schéma zapojení SST. Cívka číslo 1 je primární (magnetizační) cívka. Číslem 2 je označen vzorek tvořící jádro. Číslem 3 je označena sekundární (snímací) B-cívka. Číslem 4 je označena H-cívka. Číslem 5 je označený kompenzační induktor.

Pro kompenzaci toku vzduchem je do obvodu vložen kompenzační induktor. Primární vinutí kompenzačního induktoru je zapojeno do série s magnetizačním vinutím. Sekundární vinutí kompenzačního induktoru je zapojeno sériově se snímacím vinutím (B-cívka). Proud procházející primárním vinutím vyvolá napětí na sekundární cívice kompenzačního induktoru. Toto napětí kompenzuje napětí naindukované na B-cívce, když v měřicím přípravku není vložen vzorek.

Nastavení vzájemného induktoru se provádí na přípravku bez vloženého vzorku. Primární obvod je napájen střídavým napětím. Napětí naměřené na sekundárních vinutích by pak mělo být menší než 0,1% napětí naměřeného jen na B-cívce.

Průměrná hodnota usměrněného napětí, které je indukované na sekundárních cívkách, je úměrné maximální hodnotě magnetické indukce na vzorku. Tento standard se využívá k měření vlastností u tzv. *grain-oriented* a *non-oriented* materiálů. Měřenými vlastnostmi jsou:

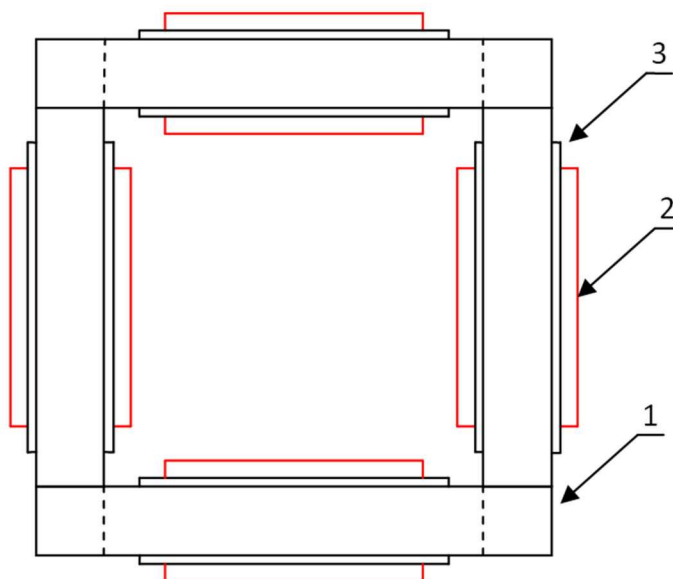
- Měrné ztráty, měrný zdánlivý výkon, efektivní hodnota intenzity magnetického pole při magnetické indukci od 1.0 do 1.8 T u *grain-oriented* materiálů.
- Měrné ztráty, měrný zdánlivý výkon, efektivní hodnota intenzity magnetického pole při magnetické indukci od 0.8 do 1.5 T u *non-oriented* materiálů.



- Špičková hodnota magnetické indukce, maximální hodnota intenzity magnetického pole při intenzitě magnetického pole 10 kA/m u *grain-oriented* materiálů.
- Špičková hodnota magnetické indukce, maximální hodnota intenzity magnetického pole při intenzitě magnetického pole 1 kA/m u *non-oriented* materiálů.

1.3. Epsteinův přístroj

Stejně jako SST je tento systém využíván k měření magnetických vlastností materiálů. Konstrukce je normalizována normou IEC 60404-02.



Obrázek 4 Epsteinův rám

Konstrukce je znázorněna na obrázku 4. Číslem 1 jsou označeny vzorky plechů, které tvoří rám. Číslem 2 jsou označeny cívky (na obrázku vyznačeny červeně). Každou cívku tvoří dvě sousedá vinutí. Číslem 3 jsou označeny kostry cívek.

Cívky jsou zapojeny sériově tak, aby vznikl primární (magnetizační) obvod a sekundární (měřicí) obvod. Šířka cívek by měla být minimálně 190 mm. Magnetický obvod je tvořen samotnými vzorky, které se na koncích překrývají a tvoří čtvercový rám. Ocelové vzorky mají normou definované rozměry – šířka 30 mm a délka 280 mm. Délka magnetického obvodu by měla být 0,94 m.

Kompenzace toku vzduchem je řešena pomocí kompenzačního induktoru stejným způsobem jako u SST.



1.4. Průzkum stavu techniky

V tabulkách 1 a 2, které jsou níže, jsou uvedeny parametry single sheet testerů, které už byly sestaveny a použity v jiných člancích. Na začátku řádku tabulky je vždy napsáno, v jakém článku byl daný tester použit i s odkazem na literaturu. Tabulka není kompletní, protože ve většině článků nejsou popsány všechny hledané vlastnosti. Neuvedené vlastnosti jsou proškrtnuty pomlčkou.

V prvním bloku sloupců jsou popsány rozměry vzorku materiálu, u kterého jsou zjišťovány jeho magnetické vlastnosti. Délka a šířka odpovídají velikosti daného SST. Tloušťka materiálu vzorku se liší od 0,3 do 1 mm.

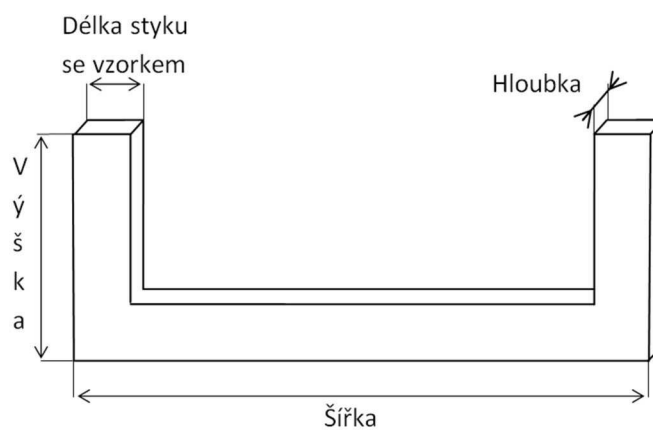
V druhém bloku sloupců jsou popsány vlastnosti magnetizační cívky. Je zde počet závitů dané cívky, průřez drátu, z kterého je navinuta, šířka cívky a umístění. Počet závitů je různý od 20 do 4275, průřez drátu byl uveden jen v několika člancích, ale u uvedených byl okolo 1 mm. Šířka magnetizační cívky odpovídá rozměrům SST a umístění je nejčastěji přímo na zkoumaném vzorku, pouze dvakrát byla umístěna na jhu.

Ve třetím bloku sloupců jsou popsány parametry měřicí B-cívky. Počet závitů této cívky se pohybuje od 25 do 500. Drát, ze kterého je cívka navinuta, je podstatně slabší než u magnetizační cívky a to od 0,03 do 0,5 mm.

Ve čtvrtém bloku sloupců je popsáno, jak je snímána intenzita magnetického pole H . Ve většině případů je H snímáno cívkou, ale u některých je H vypočítáváno z proudu magnetizační cívky. Druhý parametr je počet závitů v případě, že je H snímáno cívkou.

V posledním bloku sloupců jsou popsány parametry jha. Šířka, výška, hloubka a délka styku se vzorkem jsou zakresleny v obrázku 5. Tvar jha ve většině případů odpovídal tvaru jha na obrázku 5. Ve dvou případech bylo jádro tvořeno pouze I sloupky, u tohoto jádra není popsána šířka (šířka sloupku je dána délkou styku se vzorkem).





Obrázek 5 Rozměry jha

Další hledané parametry SST nejsou v tabulce uvedeny, protože byly uvedeny jen v několika člancích. Jedná se o druh použitého zesilovače pro napájení magnetizační cívky testeru. V článku [11] je uveden zesilovač NF4520A. V článku [14] je uveden zesilovač BA-5000. V článku [15] je uveden zesilovač APS-1102. Druhý parametr je velikost odporového bočníku. Ten byl uveden v článku [1] s hodnotou $0,25 \Omega$ a v článku [3] s hodnotou $0,969 \Omega$.





	Vzorek [mm]			Magnetizační cívka				Měřicí B-cívka		Snímání H		Rozměry jha [mm]				
Článek	Šířka	Délka	Tloušťka	Závity	Průřez [mm]	Šířka [mm]	Umístění	Závity	Průřez [mm]	Druh	Závity	Šířka	Výška	Hloubka	Délka styku se vzorkem	tvar
A measurement method of the magnetic properties of magnetic sheet by means of a single sheet tester at audio frequency [1]	105	260	1	226	1,10	254	Na vzorku	150	0,4	Výpočet	-	300	70	20	20	C
A method of local magnetic loss determination in punched ferromagnetic strips [2]	30	300	0,35	-	-	-	Na jhu	-	-	-	-	300	90	30	40	C
Comparison between the H-coil method and the magnetizing current method for the single sheet tester [3]	100	300	0,3	901	-	-	Na vzorku	284	-	Cívka	-	300	70	104	20	C
Computation of magnetic field in Rogowski-Chattock potentiometer (RCP) compensated magnetic testers [4]	-	545	0,27	145	-	-	Na vzorku	-	-	-	-	-	-	-	-	C
Design and calibration aspects of small size single sheet testers [5]	20	60	-	100	-	-	Na vzorku	100	-	-	-	60	40	20	10	C
Design and calibration aspects of small size single sheet testers [5]	5	30	-	20	-	-	Na vzorku	50	-	-	-	30	20	18	5	V
Intercomparison of a single sheet tester for amorphous alloys by round robin measurements in Japan [6]	100	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500	400	100	100	C
Identification of Preisach hysteresis model parameters using Genetic Algorithms [7]	20	250	0,35	195	-	-	Na jhu	120	-	Výpočet	-	102	57,1	25,4	25,4	C
Influence of yoke construction on magnetic characteristics of single sheet testers [8]	100	500	0,3	-	-	-	-	-	-	Cívka	-	366	-	100	31	C
Development of measurement systém of magnetic properties at high flux density using novel single-sheet tester [9]	60	240	0,5	4275	1,00	80	Na vzorku	25	-	Cívka	340	210	90	-	-	C
Characterization of soft magnetic thin film by meand of single sheet testing [10]	-	-	0,2 - 1	100	-	40	Na vzorku	270	-	-	-	60	40	20	10	C

Tabulka 1 Rešerše



Článek	Vzorek [mm]			Magnetizační cívka				Měřicí B-cívka		Snímání H		jho [mm]				
	Šířka	Délka	Tloušťka	Závity	Průřez [mm]	Šířka[mm]	Umístění	Závity	Průřez [mm]	Druh	Závity	Šířka	Výška	Hloubka	Délka styku se vzorkem	tvar
Measurement of magnetic properties of nonoriented electrical steel sheet at liquid nitrogen temperature using single sheet tester [11]	10	80	0,5	1270	0,85	-	Na vzorku	100	0,03	Cívka	250	71	45	12	-	C
A simple Compensation Method for the Accurate Measurement of Magnetic Losses With a Single Strip Tester [12]	-	-	-	-	-	-	Na vzorku	500	-	Cívka	-	290	-	50	50	C
Influence of Compressive Stress on Magnetic Properties of Laminted Electrical Steel Sheets [13]	60	250	0,35	-	-	-	Na vzorku	3	-	Cívka	-	360	-	-	30	C
Measuring Systém for Magnetostriction of Silicon Steel Sheet under Excitation Using Optical Methods [14]	-	-	-	691	-	284	Na vzorku	280	-	Cívka	-	-	-	-	-	-
Modified Single Sheet Tester Systém for Engineering Measurements [15]	-	-	0,33	400	-	-	Na vzorku	300	-	Cívka	300	Ne	90	60	30	I
Numerical Determination of the Effective magnetic Path Length of a Single-Sheet Tester [16]	-	-	-	-	-	-	Na vzorku	-	-	-	-	150	80	-	25	C
Single Sheet Tester with Variable Dimensions [17]	60	300	0,35	400	-	-	Na vzorku	300	-	Výpočet	-	ne	90	60	30	I
Standard Measurement Method for Magnetic Properties of Fe-Based Amorphous Magnetic Materials [18]	60	300	-	200	1,00	230	Na vzorku	170	0,5	Cívka	-	265	60	10	10	C
Study of Single Sheet Tester for A.C. Magnetization Charateristics Measurement [19]	-	-	-	-	-	-	Na vzorku	-	-	Cívka	-	334	95	120	15	C
Study on Standard Measurement Method of Magnetic Property of Fe-Based Amorphous Strip-Round Robin Test Results [20]	65	270	2,2	201	1,00	235	Na vzorku	50	0,32	Cívka	2000	270	65	-	15	C
Various Factors Affecting Eddy Current Distribution of Single Sheet Teters [21]	100	330	0,3	-	-	50	Na vzorku	-	-	Cívka	-	95	-	160	10	C

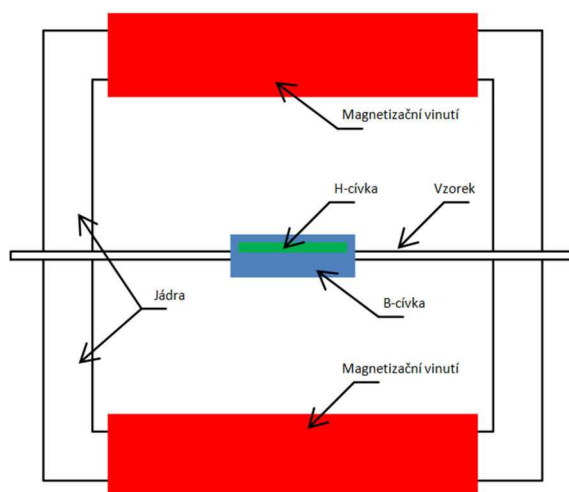
Tabulka 2 Rešerše

2. Návrh měřicího systému

V této části je popsán vlastní návrh SST, který vychází z předchozí rešerše. Je zde uvedena koncepce měřicího systému od konstrukce po elektrické zapojení jednotlivých komponent. V první části je popsána konstrukce držáku jader a cívek. Dále jsou popsány komponenty použité k napájení celého systému. Na konci této kapitoly je realizace a zkompletování systému.

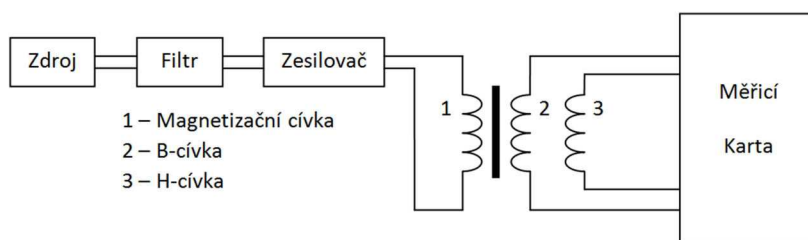
2.1. Koncepce měřicího systému

Měřicí systém se skládá ze dvou U-jader. Na jádrech jsou navinuty magnetizační cívky o 180 závitů. Sekundární B-cívka má 65 závitů a je navinuta na měřený vzorek. H-cívka má též 65 závitů a je umístěna na vzorku pod B-cívkou. Konstrukce měřicího zařízení je na obrázku níže.



Obrázek 6 Konstrukce SST

Elektrické zapojení systému je znázorněno níže. Celý systém je napájen ze spínaného zdroje. Aby měření neovlivňovaly spínací procesy ve zdroji, je do obvodu vložen filtr. Vyhlazené napětí je přivedeno na operační zesilovač s vysokým výstupním proudem. Tento zesilovač napájí magnetizační cívku. Naměřené hodnoty ze sekundárních cívek měří měřicí karta.



Obrázek 7 Elektrické schéma SST

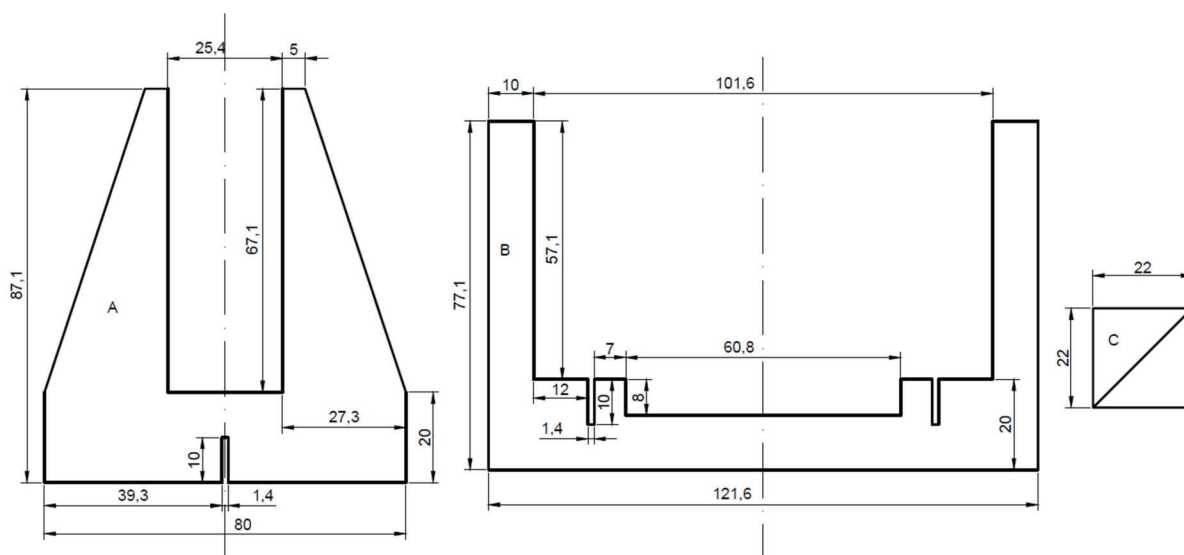


2.2. Návrh stojanu SST a cívek

Magnetizační i měřicí cívka musí mít určitý tvar a umístění na SST, k tomu slouží držáky cívek. Jádra SST jsou uchyceny ve stojanu. Na výrobu držáků cívek a stojanu byly použity desky z nemagnetického materiálu, aby neovlivňovaly měření. Pro návrh stojanu a držáků cívek byl použit software autoCAD. Navržené držáky cívek byly vyřezány laserovou řezačkou z desky ze sklolaminátu. Tloušťka tohoto materiálu je 1,4 mm.

2.2.1 Stojan SST

Na obrázku níže je vyobrazen výkres stojanu SST. Pro sestavení stojanu je třeba 2× díl A, 1× díl B a 1× díl C. Díly A a B jsou do sebe zasazeny v místě zářezu o šířce 1,4 mm. Díl C jsou dva trojúhelníky, které slouží ke zpevnění spojení mezi díly A a B. Trojúhelníky jsou nalepeny do spodní části stojanu jednou odvěsnou k dílu A a druhou k dílu B. Rozměry základny stojanu SST jsou tedy $121,6 \times 80$ mm.

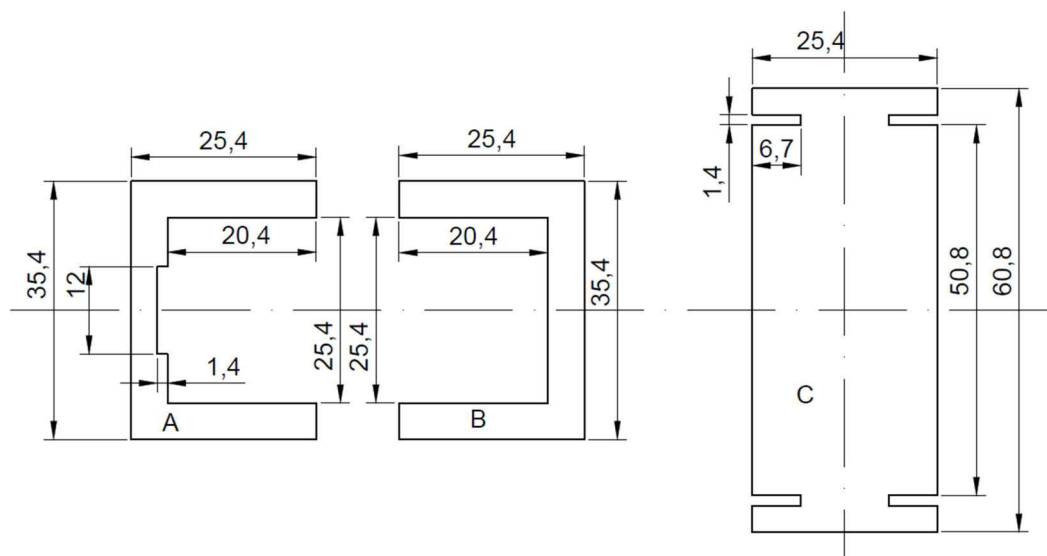


Obrázek 8 Návrh stojanu SST



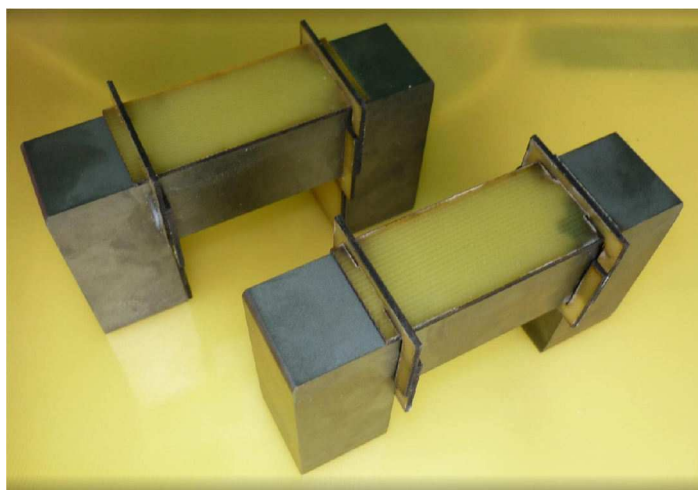
2.2.2 Magnetizační cívky

Magnetizační cívky jsou umístěny na jádru, kostra pro tyto cívky drží jejich tvar. Výkres tohoto držáku je zobrazen níže.



Obrázek 9 Držák magnetizační cívky

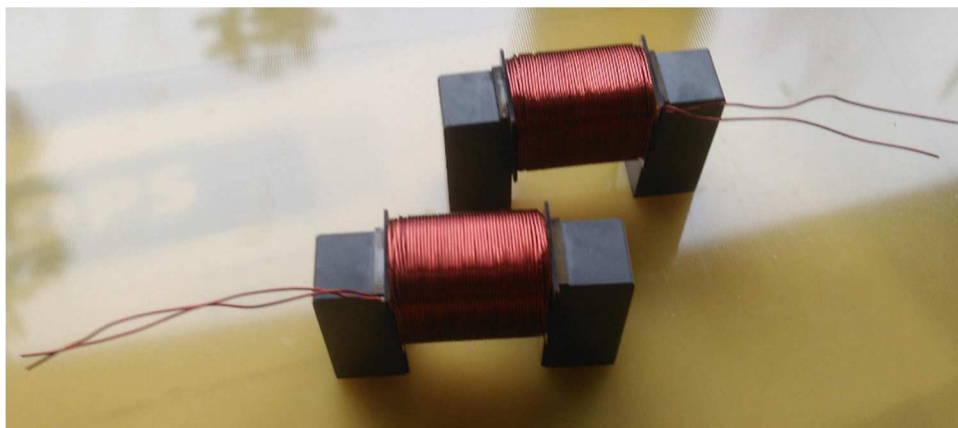
Pro jeden držák je potřeba 2× díl A, 2× díl B a 1× díl C. Díl C je položený na jádru a díly A a B obepínají jádro dokola, tím je vymezen prostor k navinutí cívky o délce 50,8 mm. Umístění na jádru je zobrazeno na obrázku níže.



Obrázek 10 Držák magnetizační cívky

Vymezený prostor pro cívku je omotan jednou vrstvou pásky z PVC. Do boku kostry cívky jsou vyvrtány dvě díry pro vyvedení konců cívek. Na každé jádro je navinuta cívka z lakovaného drátu o průměru 1,08 mm. Cívka má 180 závitů ve 4 vrstvách, tj. 45 závitů na vrstvu. Na obrázku níže jsou vyfoceny navinuté cívky.

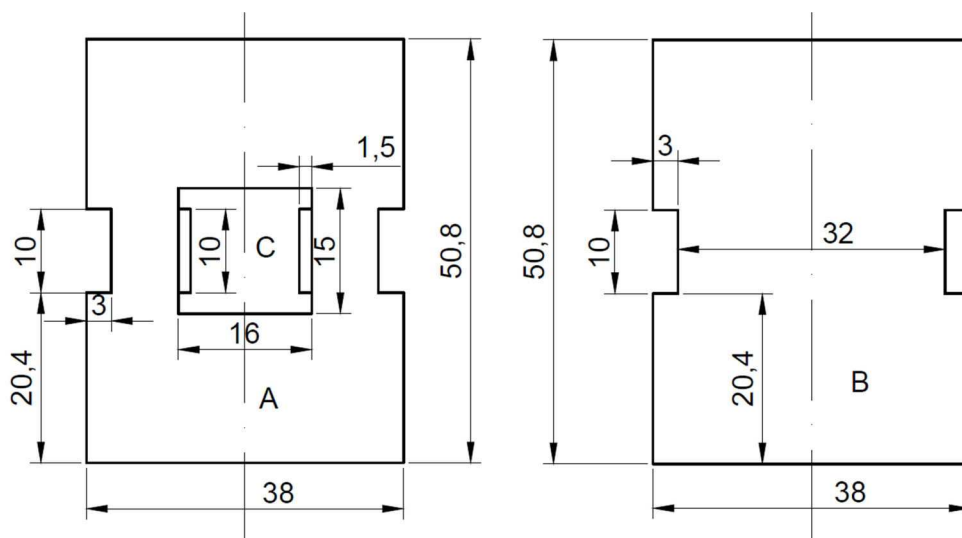




Obrázek 11 Navinuté magnetizační cívky

2.2.3 Snímací cívky

Snímací B a H cívky jsou umístěny na měřeném vzorku. Aby bylo možno měnit vzorky plechů mezi měřeními, je potřeba vytvořit držák cívky tak, aby byl přichycen k jádru, ale ne ke vzorku. Aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků měření, musí být měřicí cívky uprostřed měřeného vzorku. V tomto případě, jak je vidět z obrázků níže, je délka části vzorku tvořící magnetický obvod dlouhá 50,8 mm a délka B-cívky je 10 mm.

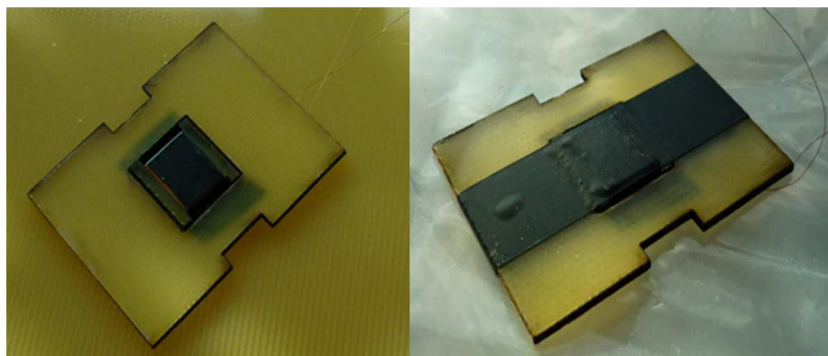


Obrázek 12 Držák snímacích cívek

Na obrázku výše je výkres držáku B a H snímací cívky. Jádro H-cívky tvoří část C, která je uvnitř části A. Části A a B mají kraje prodloužené o 3 mm, to slouží k vymezení šířky snímací B-cívky, a také k možnosti nalepení distančních rozpěrek, které vytvoří mezeru mezi částmi A a B. Tyto části jsou k sobě přes rozpěrky přilepeny a rozpěrky vytvářejí mezeru pro měřený vzorek.

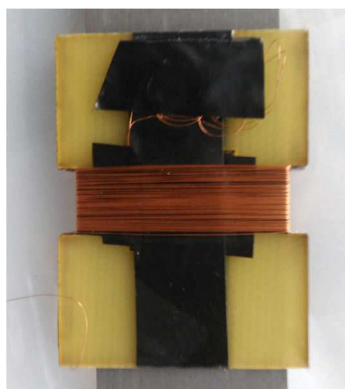


Na obrázku níže je vyfocena H-cívka, která je již omotána černou PVC páskou. H-cívka je vinuta z lakovaného drátu o průměru 0,1 mm a má 65 závitů v jedné vrstvě. Cívka je vložena do kostry B-cívky a uchycena páskou ještě před spojením dílů A a B.



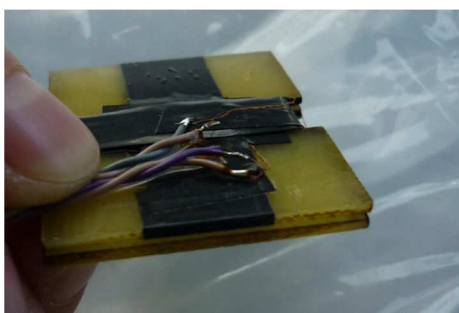
Obrázek 13 H-cívka

Po spojení dílů A a B byla navinuta B-cívka. Tato cívka je vinuta ze stejného drátu jako H-cívka a má též 65 závitů. Cívka je vyfocena na obrázku níže.



Obrázek 14 B-cívka

Obě cívky jsou vinuty ze slabého drátku, proto musí být jejich vývody zesíleny silnějším a ohebnějším vodičem. Na obrázku níže je zobrazeno napojení a zároveň je zde vidět mezera mezi díly A a B, kterou tvoří rozpěrky.

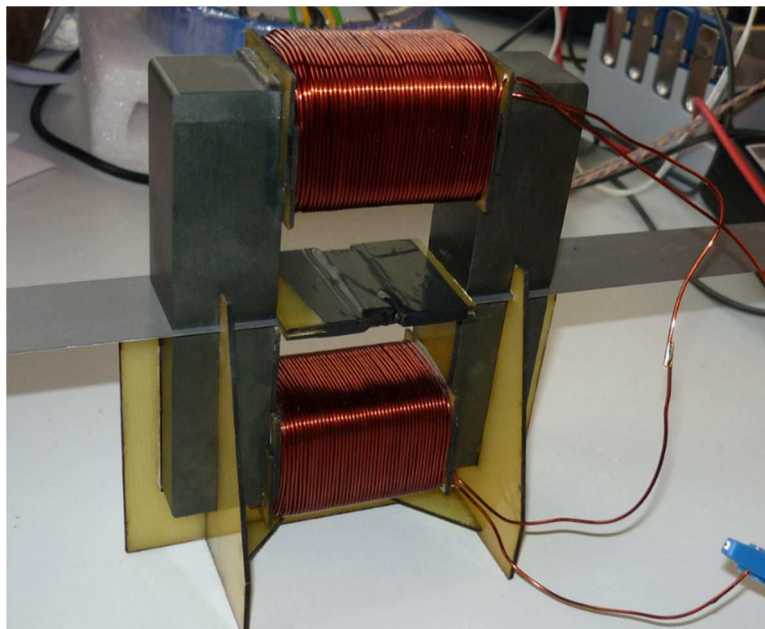


Obrázek 15 Snímací cívky



2.2.4 Sestavení SST

Na fotografii níže je sestavený single sheet tester. Do SST je vložen vzorek (plech), který prochází kostrou měřicích cívek a na koncích je sevřen mezi horní a spodní jádro. Celý měřicí systém stojí ve stojanu. Na stojanu je vidět místo nalepení trojúhelníků pro zpevnění konstrukce.



Obrázek 16 Single Sheet Tester

2.3 Výpočet intenzity magnetického pole

Pro zjištění velikosti intenzity magnetického pole je do systému zařazena H-cívka. Velikost intenzity může být vypočítána z proudu magnetizačním vinutím, to je ale nepřímá metoda. Napětí na cívkce je odezvou na měnící se magnetické pole. Vzorec 4 popisuje vztah mezi intenzitou magnetického pole H a napětím na cívkce H , kde N_H je počet závitů H-cívky, μ_0 je permitivita vakua, S_H je plocha cívkky a $v(t)$ je průběh napětí na cívkce.

$$H(t) = \frac{1}{N_H * \mu_0 * S_H} * \int v(t) dt \quad (4)$$

2.4 Napájecí zdroj

Pro napájení celého systému je potřeba stejnosměrný napájecí zdroj. Vyhovujícím zdrojem pro tento účel je zdroj LRS-100-24 od firmy Mean Well. Tento zdroj má napětí 24 V a výkon 100 W. Pro napájení systému jsou potřeba dva tyto zdroje, protože potřebujeme vytvořit symetrické napájení ± 24 V.



2.5 Výkonový zesilovač

Výkonový zesilovač zesiluje signál, který má být přiveden na magnetizační cívku. Zesilovač je napájen z napájecího zdroje. Tento zesilovač musí dodat dostatečný proud pro vytvoření vysoké intenzity magnetického pole, tj. přibližně 3 A.

2.5.1 Výběr operačního zesilovače

Operační zesilovač napájí magnetizační cívku. Magnetizační cívka musí vytvořit vysokou intenzitu magnetického pole, to znamená, že proud, který do cívky dodává operační zesilovač, je vysoký (až 3 A). Pro napájení je tedy třeba vybrat OZ, který bude schopen tento proud dodávat. V tabulce 3 jsou vypsány operační zesilovače s vysokým výstupním proudem od několika výrobců (Texas Instruments, International Rectifier, Linear Technology, Analog Devices a STMicroelectronics). Operační zesilovače od výrobců Analog Devices, Linear technology a STMicroelectronics nedodávají dostatečně velký výstupní proud. Pro tuto aplikaci jsou vhodné operační zesilovače od výrobce Texas Instruments OPA544, OPA548, OMA541 nebo OPA549. Vybrán byl zesilovač OPA549.

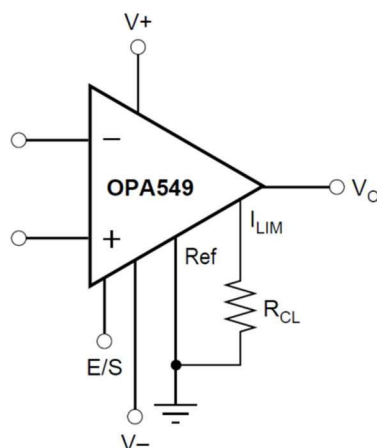
Tabulka 3 Operační zesilovače s vysokým výstupním proudem

Zesilovač	Výrobce	Výstupní proud [mA]
OPA541	Texas Instruments	10000
OPA549	Texas Instruments	8000
OMA541	International Rectifier	5000
OPA544	Texas Instruments	4000
OPA548	Texas Instruments	3000
OPA569	Texas Instruments	2400
LT1210	Linear Technology	2000
LT1739	Linear Technology	1200
LT6300	Linear Technology	1200
L272	STMicroelectronics	1000
AD80216	Analog Devices	600
AD8392A	Analog Devices	500
AD815	Analog Devices	500

2.5.2 Operační zesilovač OPA 549

Hlavními parametry operačního zesilovače od firmy Texas Instruments jsou: stálý výstupní proud 8 A (špičkově 10 A), napájecí napětí je od ± 4 do ± 30 V, doba přeběhu je 9 V/ μ s. Hlavní výhody tohoto zesilovače jsou tepelná ochrana, možnost odpojení výstupu a možnost limitace výstupního proudu. Na obrázku níže je schématická značka s označenými vývody.





Obrázek 17 OPA549 [22]

Jako u každého operačního zesilovače je zde invertující a neinvertující vstup a výstup. Dále je zde napájení označené $V+$ a $V-$. Oproti běžnému operačnímu zesilovači jsou zde navíc tři vývody a to E/S , Ref a I_{lim} .

Pin Ref slouží jako referenční bod pro piny E/S a I_{lim} . Referenční napětí se může pohybovat od záporného napájení po kladné napájení – 8V. V případě uvedeném na obrázku výše je reference připojena k zemi.

Pin E/S má dvě různé použití: 1.) Možnost vypnutí výstupu z operačního zesilovače přivedením logické nuly na pin (0,8V a méně). 2.) Indikace vypnutí teplotní ochranou OZ sledováním napětí na tomto pinu.

Pin I_{lim} slouží k limitaci výstupního proudu. Nastavení limitu je možno udělat dvěma různými způsoby. První je naznačen na obrázku výše. Jedná se o rezistor R_{CL} , který spojuje pin I_{lim} s pinem Ref . Velikost tohoto odporu určuje limit výstupního proudu. Druhý způsob je digitální limitace pomocí A/D převodníku. Závislost velikosti limitace výstupního proudu je dána v tabulce 4.

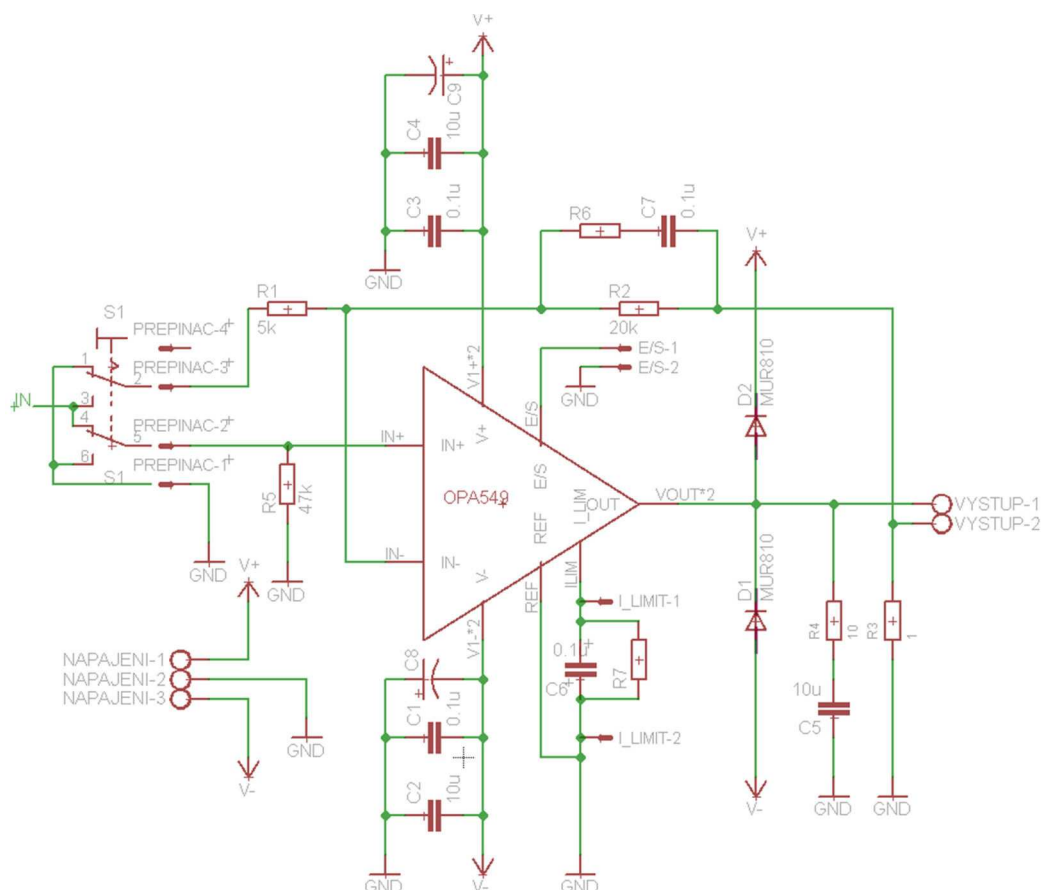
Tabulka 4 Nastavené proudového limitu

Způsob nastavení:	Analogový	Digitální	
Požadovaný limit [A]	Rezistor (R_{CL}) [kΩ]	Proud (I_{set}) [uA]	Napětí (V_{set}) [U]
0	I_{lim} nepřipojeno	0	$Ref + 4,75$
2,5	22,6	158	$Ref + 3,56$
4	11,3	253	$Ref + 2,85$
6	4,99	380	$Ref + 1,9$
8	1,87	506	$Ref + 0,95$
10	I_{lim} připojeno k Ref	633	Ref



2.5.3 Návrh zapojení zesilovače

Pro návrh zesilovače byl použit software EAGLE. Na obrázku níže je zobrazeno schéma zapojení výkonového zesilovače. Hlavní součástka je operační zesilovač OPA549 vybraný v předchozí kapitole.



Obrázek 18 Schéma zapojení výkonového zesilovače

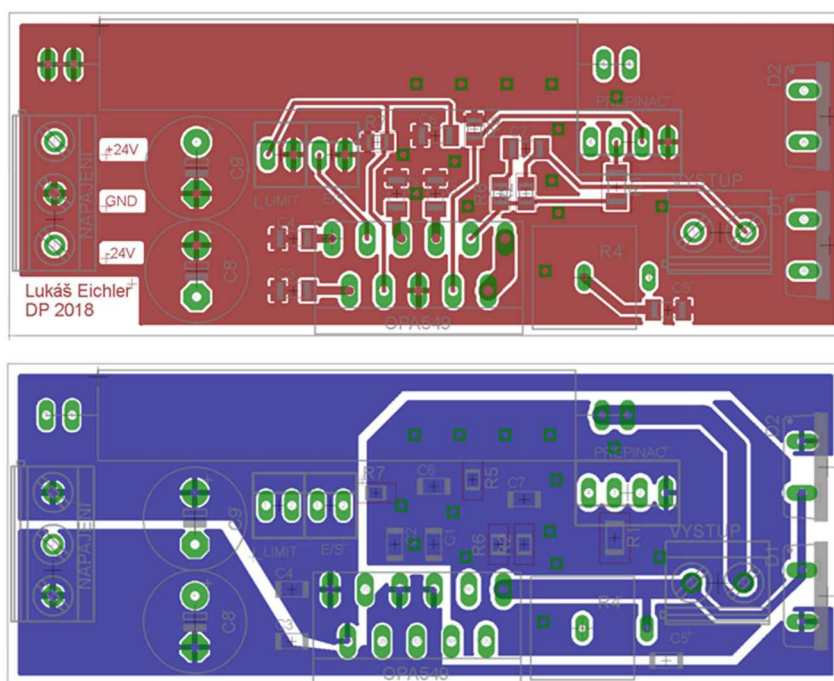
Na schématu je zleva spínač S1, který bude umístěn na krabici zařízení. Na tento spínač je přiveden signál, který má být zesílen (IN). Spínač slouží k přepínání mezi napětovým a proudovým režimem. Přepínač je připojen ke svorkovnici s názvem přepínač. Když je přiveden na pin 3 zesilovaný signál a na pin 2 zem, pracuje zesilovač v proudovém režimu s invertovaným výstupem. V opačném případě pracuje zesilovač v proudovém režimu s neinvertovaným výstupem. Pod svorkovnicí přepínač je další svorkovnice s názvem napájení. Na tuto svorkovnici je přivedeno napájecí napětí z napájecích zdrojů. Dále je na schématu operační zesilovač OPA549. K napájecím pinům operačního zesilovače V+ a V- je přivedeno napájecí napětí. K napájecím pinům OZ jsou dále připojeny dva keramické blokovací kondenzátory a jeden elektrolytický kondenzátor. Tyto kondenzátory slouží k vykrytí odběrových špiček. Pin Ref je připojený k zemi. Mezi pin I_{lim} a pin Ref je zapojena svorkovnice I limit, do které bude připojen rezistor určující velikost limitu výstupního proudu.



Mezi svorky je připojen i odpor R7 a kondenzátor C6. Ty slouží jako vysokofrekvenční filtr na vstupu I_limit. Pin E/S je vyveden na svorkovnici E/S pro možné budoucí vylepšení. Dále jsou zde dvě diody připojeny k výstupu z operačního zesilovače. Ty slouží k ochraně zesilovače v případě, že je na výstupu induktivní zátěž (tento případ) – vracející se energie je odvedena přes diody do zdroje. Dále je k výstupu připojen odpor R4 v sérii s kondenzátorem C5, které společně zajišťují vysokofrekvenční stabilitu. Výstup je vyveden na svorkovnici s názvem výstup. Druhý pin výstupní svorkovnice je připojen na odpor R3. Tento odpor slouží k měření proudu v proudovém režimu zesilovače. Ve zpětné vazbě zesilovače je odpor R2, ke kterému je připojen RC člen R6, C7. Dále je zde odpor R5 připojený k neinvertujícímu vstupu zesilovače, ten slouží k připojení definování nulové hodnoty na vstupu během přepínání režimů. Poslední součástka je odpor R1, který společně s odporem R2 určuje zesílení zesilovače.

2.5.4 Plošný spoj zesilovače

Na obrázku níže je plošný spoj operačního zesilovače. Nahoře (červená) je vrchní strana desky, spodní strana desky je dole (modrá). Napájecí svorkovnice je vlevo. Ve vrchní vrstvě je rozlita měď spojena se zemí. Ve spodní vrstvě je rozlita měď spojena s kladným a záporným napětím. Uprostřed je operační zesilovač. Blokové kondenzátory jsou co nejblíže napájecím pinům OZ. Ovládací obvody jsou uprostřed plošného spoje. Z důvodu snížení rušení je v této části rozlita měď spojena se zemí v obou vrstvách. Napravo je výstupní svorkovnice s ochrannými diodami. Proudové cesty jsou dimenzovány na maximální proud 10 A.

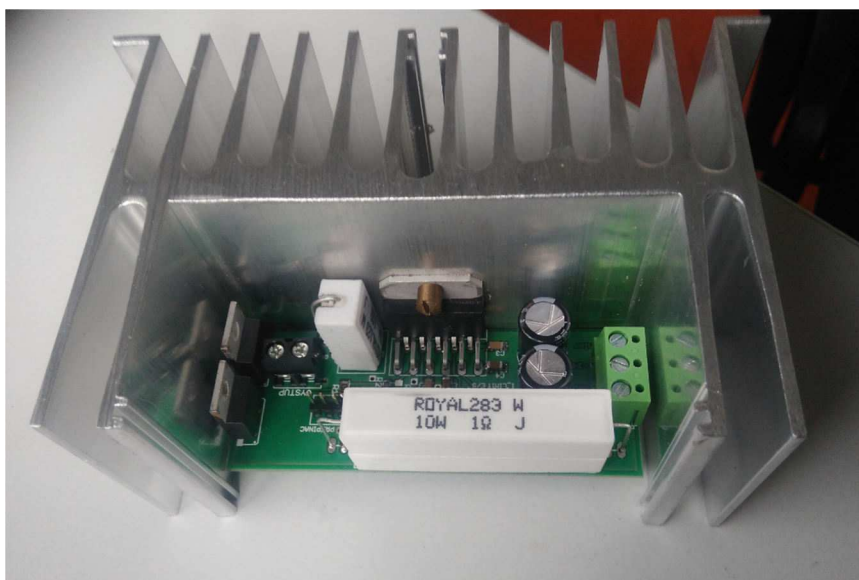


Obrázek 19 Plošný spoj výkonového zesilovače



2.5.5 Osazení a oživení plošného spoje zesilovače

Plošný spoj byl vyroben ve firmě PragoBoard. Osazen byl manuálně pomocí mikropájky. Nejprve byly osazeny součástky SMD a poté součástky THT. Operační zesilovač je přidělán k hliníkovému chladiči. Ten slouží k odvodu tepla z této součástky.



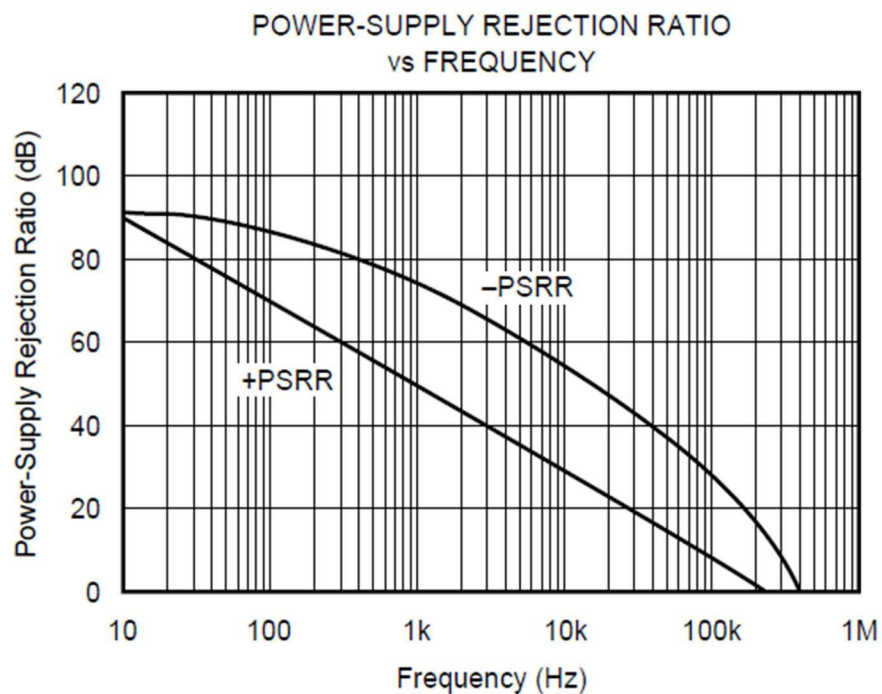
Obrázek 20 Osazený plošný spoj

Při ožiování spoje nebyly zjištěny žádné chyby v návrhu. Pouze zesilovač funguje až od napájecího napětí 6,5 V, nikoli od 4,5 V, jak je uvedeno v katalogu. Pod tímto napětím zmizela na výstupu jedna polarita. Při vyšším napětí funguje zesilovač korektně. Výstupní proud ze zesilovače je omezen rezistorem na 5 A.

2.6 Filtr napětí

Napětí ze spínaného zdroje je zatíženo šumem, který je způsobený právě spínáním zdroje. Výrobce uvádí v katalogovém listu, že zdroj LRS-100-24 má spínací frekvenci 65 kHz a maximální zvlnění je 150 mV (špička-špička). Operační zesilovač OPA549 tlumí šum napájecího zdroje v závislosti na frekvenci šumu, tato závislost je popsána na obrázku níže. Z grafu vidíme, že kladná a záporná větev mají rozdílný průběh potlačení průniku rušení z napájení. Pro obě platí, že útlum je pro nízké frekvence vysoký, ale se zvyšující se frekvencí klesá. Útlum šumu o frekvenci 65 kHz je pro kladnou větev napájení přibližně 12 dB, pro zápornou větev je útlum o něco vyšší, přibližně 35 dB. To znamená, že by tento šum ovlivňoval výstupní signál, proto do obvodu zařadíme filtr napětí.

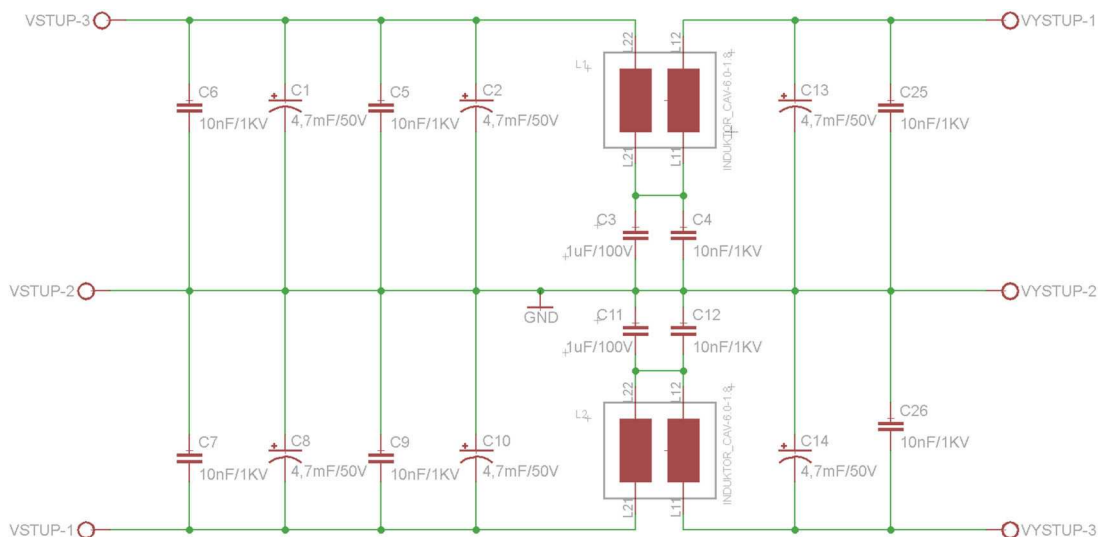




Obrázek 21 Závislost útlumu šumu z napájecího zdroje na frekvenci šumu [22]

2.6.1 Návrh filtru napětí

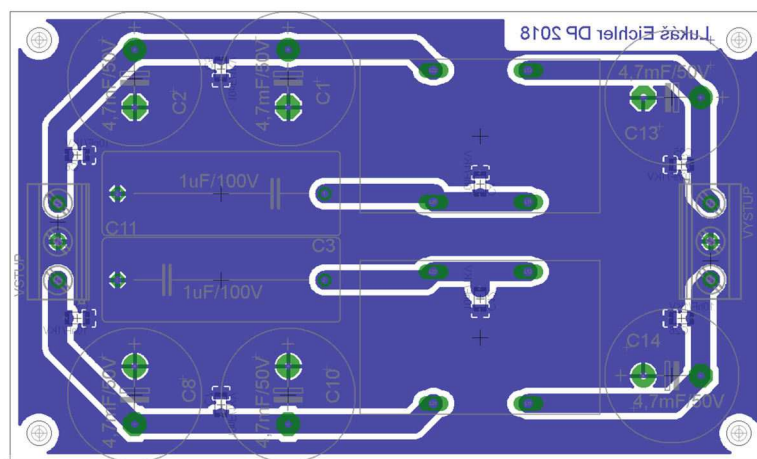
Filtr napětí je inspirován filtrem od firmy Federmann. Jedná se o LC filtr, který je určený k odstranění vysokofrekvenčního šumu. Schéma zapojení filtru je na obrázku níže. Nalevo je vstupní svorkovnice a napravo je výstupní. Na vstupní svorky je připojeno napětí z napájecích zdrojů. Výstup je přiveden na výkonový zesilovač. Filtr se skládá z keramických a elektrolytických kondenzátorů a cívek se společným jádrem označené L1, resp. L2.



Obrázek 22 Schéma filtru



Na obrázku níže je plošný spoj filtru. Obvod není nijak složitý, proto stačí jednovrstvá deska plošného spoje. Nalevo je vstupní a napravo je výstupní svorkovnice. Rozlité měď je spojena se zemí a ostatní cesty jsou dimenzovány na proud 10 A.



Obrázek 23 Plošný spoj filtru

2.6.2 Osazení a oživení plošného spoje

Plošný spoj byl také vyroben ve firmě PragoBoard. Osazen byl stejně jako plošný spoj zesilovače. Na obrázku níže je vyfocený osazený plošný spoj.

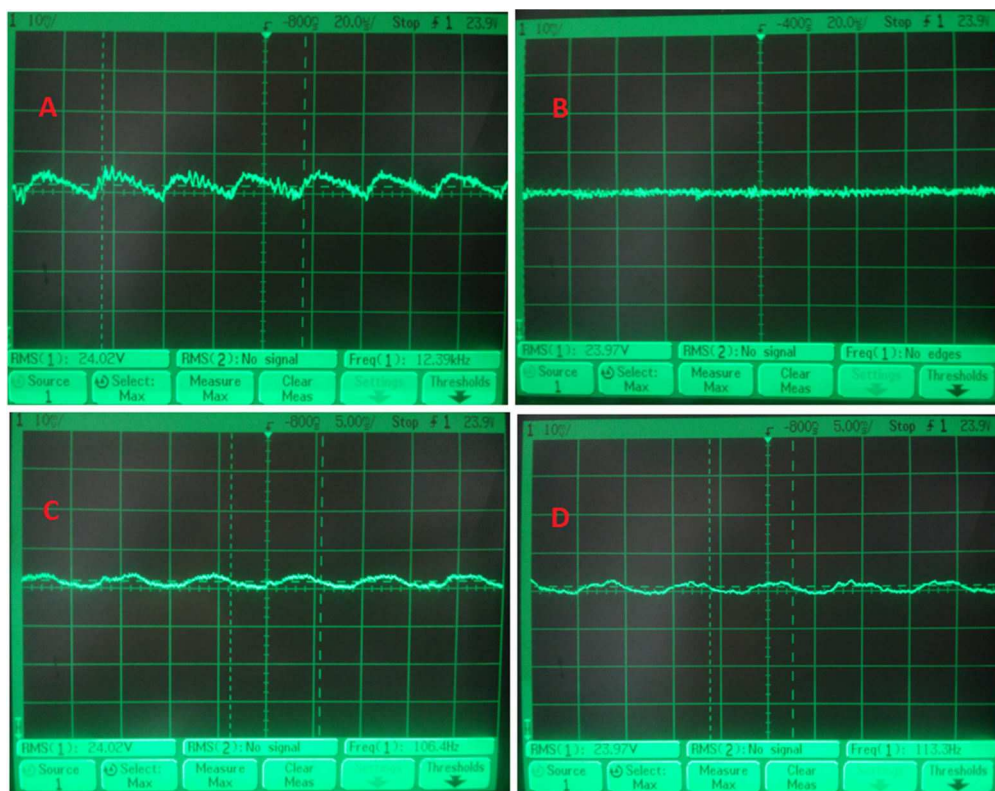


Obrázek 24 Osazený plošný spoj

Pro odzkoušení funkčnosti filtru jsme využili spínaných zdrojů LRS-100-24, které později budou napájet celý systém. Výstup filtru byl zatížen proudem 1 A. Na obrázku níže jsou zobrazeny průběhy napětí na filtru. Průběh A je napětí před filtrem, vidíme na něm, že je zvlněné spínacími pochody na vysoké frekvenci. Zvlnění při proudu 1A má hodnotu špička-špička přibližně 10 mV. Na obrázku B je napětí za filtrem. Z tohoto napětí je kompletně odfiltrované vysokofrekvenční zvlnění. Průběhy C a D jsou průběhy napětí před a za filtrem. Je na nich zřetelné nízkofrekvenční zvlnění. Toto zvlnění je způsobené promítnutím frekvence sítě



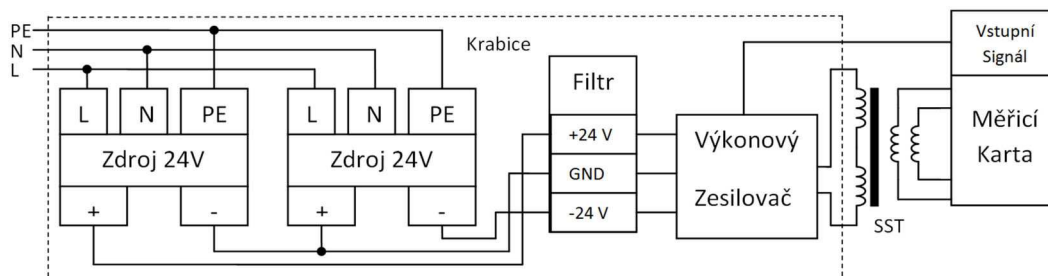
50 Hz. Průběhy jsou téměř totožné, filtr tedy tyto nízké frekvence neodfiltruje. S tímto zvlněním si ale poradí útlum operačního zesilovače, který je na této frekvenci vysoký přibližně 75 dB, resp. 90 dB.



Obrázek 25 Průběhy napětí na filtru. Průběhy A a C jsou napětí na vstupu filtru. Průběhy B a D jsou napětí na výstupu filtru.

2.7 Kompletace systému

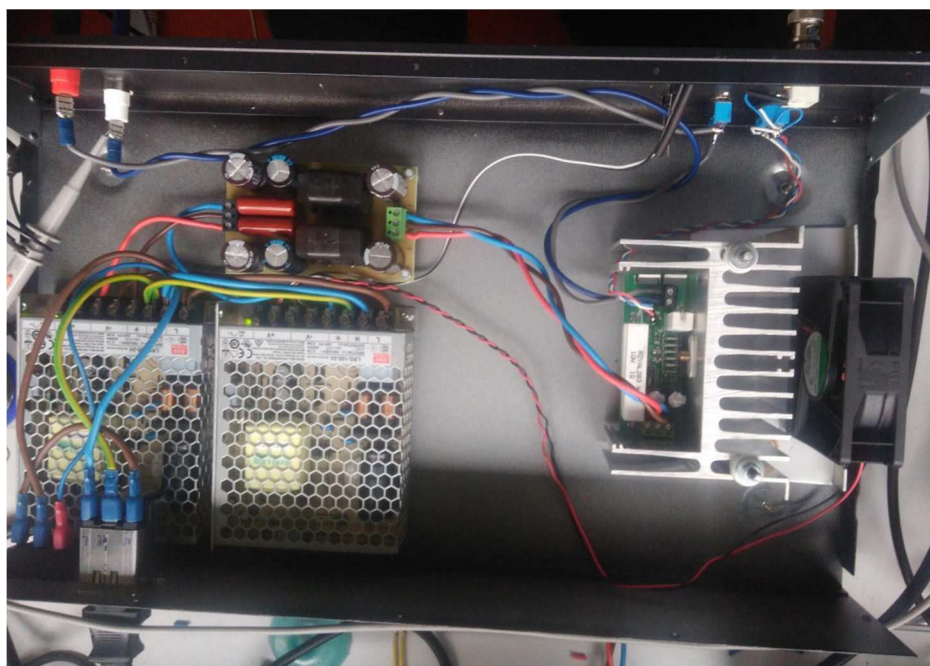
Před první měření je třeba pospojovat všechny komponenty systému. To znamená přivést k napájecím zdrojům síťové napětí. Z těchto zdrojů zapojením vytvořit napětí ± 24 V s vyvedenou zemí. Takto upravené napětí je přivedeno na filtr napětí. Z filtru je napětí přivedeno na plošný spoj zesilovače. K zesilovači je dále potřeba přivést vstupní signál, který má zesilovač zesílit. Zesílený signál je přiveden k magnetizačním cívkám. Z měřicích cívek je signál přiveden na měřicí kartu. Celé zapojení je zobrazeno na obrázku níže.



Obrázek 26 Schéma propojení komponent

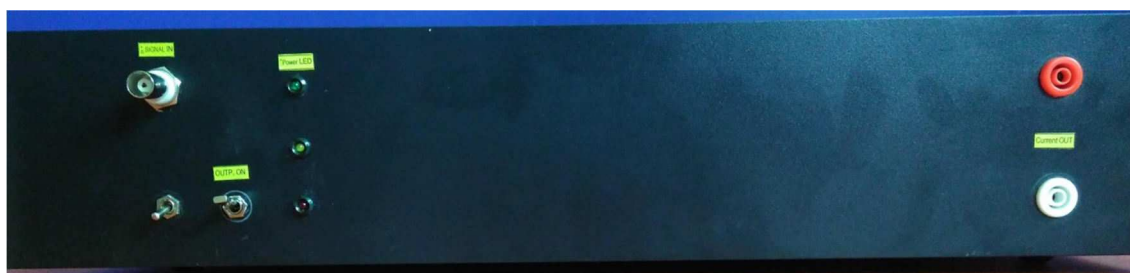


Celé zařízení je nyní třeba vložit do krabice. Na obrázku níže je fotka komponent vložených do krabice. V horní části je přední čelo krabice, kde je vstup, výstup, kontrolky a přepínače. V levé části krabice jsou spínané zdroje, ke kterým je přivedeno síťové napětí ze síťové zásuvky a vypínače, které jsou umístěny na zadní stěně krabice. Síťová zásuvka obsahuje filtr, který pomáhá k odstranění rušení. Nad spínanými zdroji je filtr napětí. V pravé části krabice je zesilovač s chladičem. Před chladičem je připevněn ventilátor.



Obrázek 27 Rozložení komponent v krabici

Na obrázku níže je vyfocen přední panel krabice. Na předním panelu je vlevo BNC konektor pro vstupní signál. Vpravo od vstupního konektoru jsou kontrolky. Zelená kontrolka slouží k signalizaci zapnutí přístroje. Pod vstupním konektorem jsou dva přepínače. Levý přepínač slouží k přepínání mezi invertujícím a neinvertujícím zapojením zesilovače. Pravý slouží k odpojení výstupu ze zesilovače. Výstupní svorky jsou vpravo.



Obrázek 28 Přední panel



3 Měření na SST

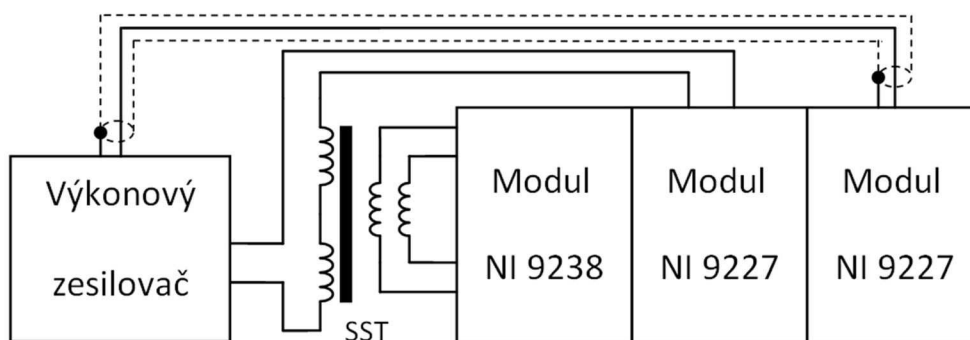
Měření proběhla na třech pásčích transformátorových plechů. Tento plech má vlastnosti orientované díky válcování při výrobě. Dva plechy jsou střiženy po směru válcování, tedy ve směru snadného magnetování. Třetí je střižený kolmo ke směru válcování, tedy ve směru nesnadného magnetování.

Pro měření byl použit měřicí systém firmy National Instrument. Základem je šasi cDAQ-9174, které disponuje čtyřmi sloty. Do slotů byly pro měření zapojeny moduly NI 9238, NI 9263 a NI 9227.



Obrázek 29 Měřicí karta

Na obrázku níže je zobrazeno schéma zapojení měření. Vlevo je výkonový zesilovač, ke kterému je přiveden vstupní signál z modulu NI9227 stíněným kabelem. Výstup ze zesilovače je přiveden na modul NI9227, který měří proud primární cívky. Napětí naindukované na cívkách je přivedeno na modul NI 9238, který jej změří.

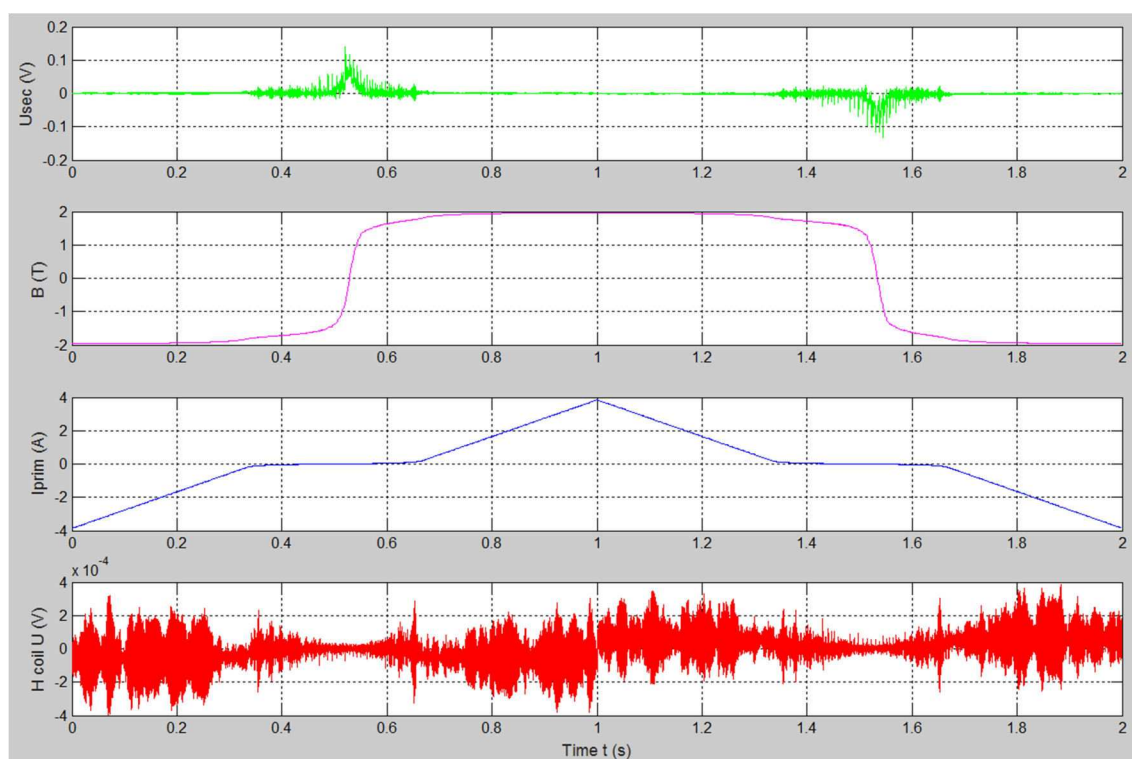


Obrázek 30 Schéma zapojení měření



3.1 Vzorek č. 1 měřen ve směru snadného magnetování

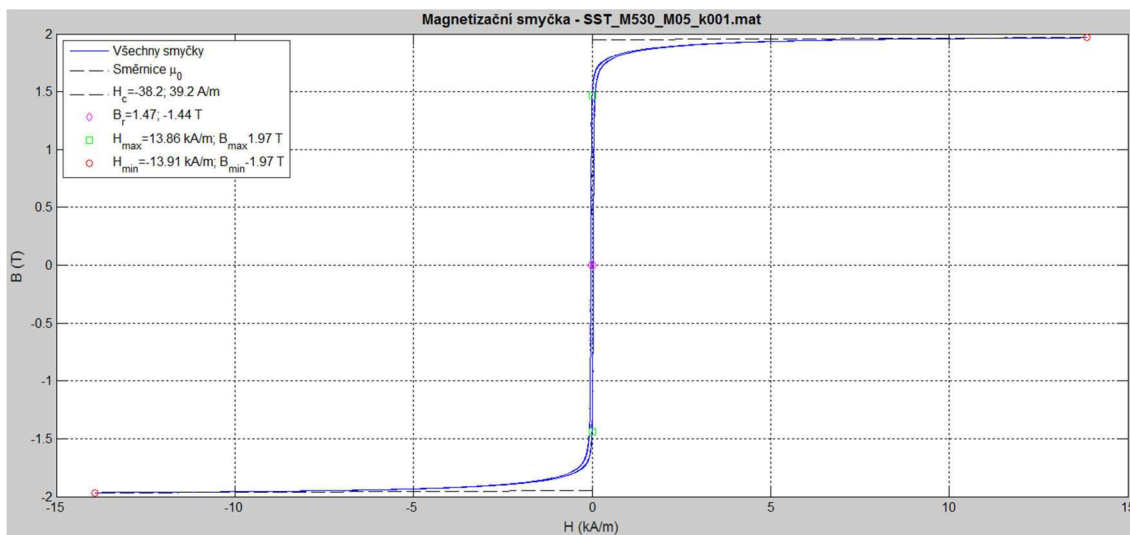
Na obrázku níže jsou zobrazeny časové průběhy měřených a vypočtených veličin na vzorku č. 1, který je střížen ve směru snadného magnetování. První, U_{sec} , je průběh napětí na B-cívce. Integrací tohoto signálu dostaneme průběh intenzity magnetické indukce B (druhý průběh). Třetí průběh je magnetizační proud. Tento proud je dán vstupním signálem do zesilovače. Pro měření se používá modifikovaný trojúhelníkový průběh, ten snižuje strmost v oblasti průchodu nulou a to z důvodu omezení indukovaného napětí v sekundárním vinutí při zachování krátkého času zkoušky. Pro určení H používáme výpočet z proudu primární cívky a geometrie přístroje, nebo integraci napětí z H-cívky. Napětí na H-cívce je poslední průběh na obrázku 31. Tento signál je ale značně zatížen šumem.



Obrázek 31 Časový průběh signálů na vzorku č. 1, první průběh je napětí na B-cívce, druhý průběh je intenzita magnetické indukce, třetí je průběh proudu magnetizační cívky a poslední je napětí na H-cívce.

Na obrázku 32 je hysterezní křivka tohoto transformátorového plechu. Skript označil významné body na křivce, jako je remanentní indukce B_r , koercitivní síla H_c a maximální a minimální intenzita magnetického pole H_{min} a H_{max} . Hodnoty těchto bodů jsou v levém rohu tohoto grafu. Hysterezní křivka tohoto materiálu je strmá a má malou plochu. To značí nízké ztráty při přemagnetování. Koleno křivky je až na magnetické indukci 1,7 T. Při intenzitě H 10 kA/m a výše je křivka aproximována směrnicí permeability μ_0 .

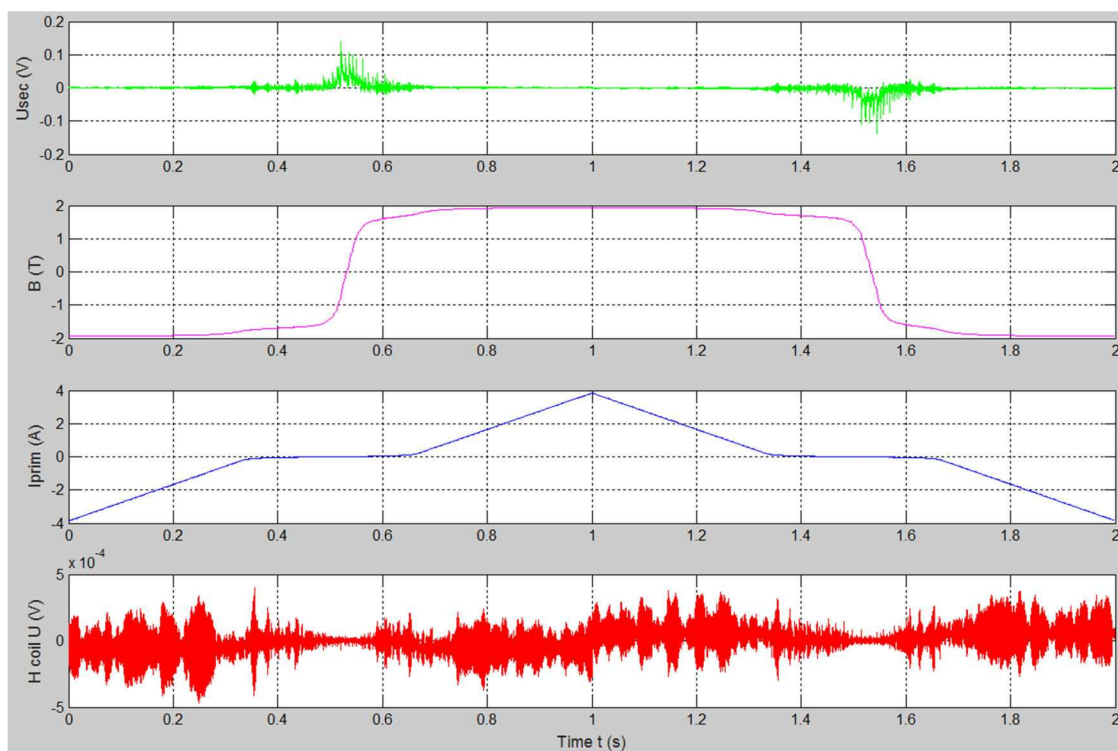




Obrázek 32 Hysterezní smyčka vzorku č. 1

3.2 Vzorek č. 2 měřen ve směru snadného magnetování

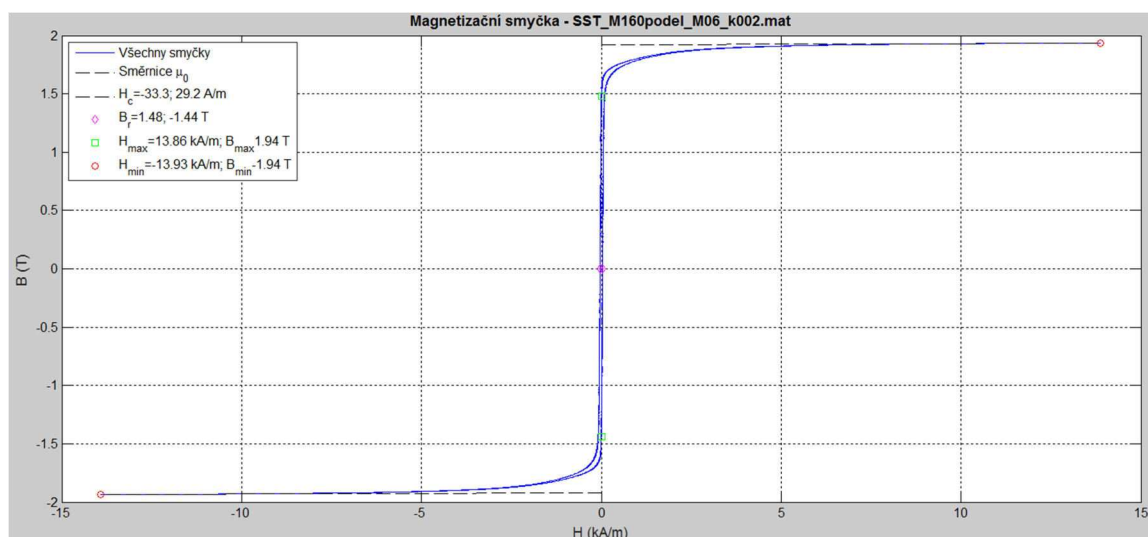
Na obrázku níže jsou zobrazeny časové průběhy měřených a vypočtených veličin na vzorku č. 2, který je střižen ve směru snadného magnetování. První je průběh napětí na B-cívce, druhý je vypočítaný průběh magnetické indukce, třetí je magnetizační proud a poslední průběh je napětí na H-cívce. Měření proběhlo stejně jako u předchozího materiálu.



Obrázek 33 Časový průběh signálů na vzorku č. 2, první průběh je napětí na B-cívce, druhý průběh je intenzita magnetické indukce, třetí je průběh proudu magnetizační cívky a poslední je napětí na H-cívce.



Na obrázku 32 je hysterezní křivka tohoto transformátorového plechu. Na grafu jsou opět vyznačeny důležité body křivky. Oba materiály, č. 1 i č. 2, jsou stříženy ve směru snadného magnetování, ale jejich vlastnosti jsou lehce odlišné. Koercitivní síla H_c u tohoto materiálu je o 10 A/m menší než u předchozího materiálu, to znamená nižší ztráty. Remanentní indukce B_r má téměř totožnou hodnotu, stejně jako maxima a minima magnetické indukce B u obou vzorků.



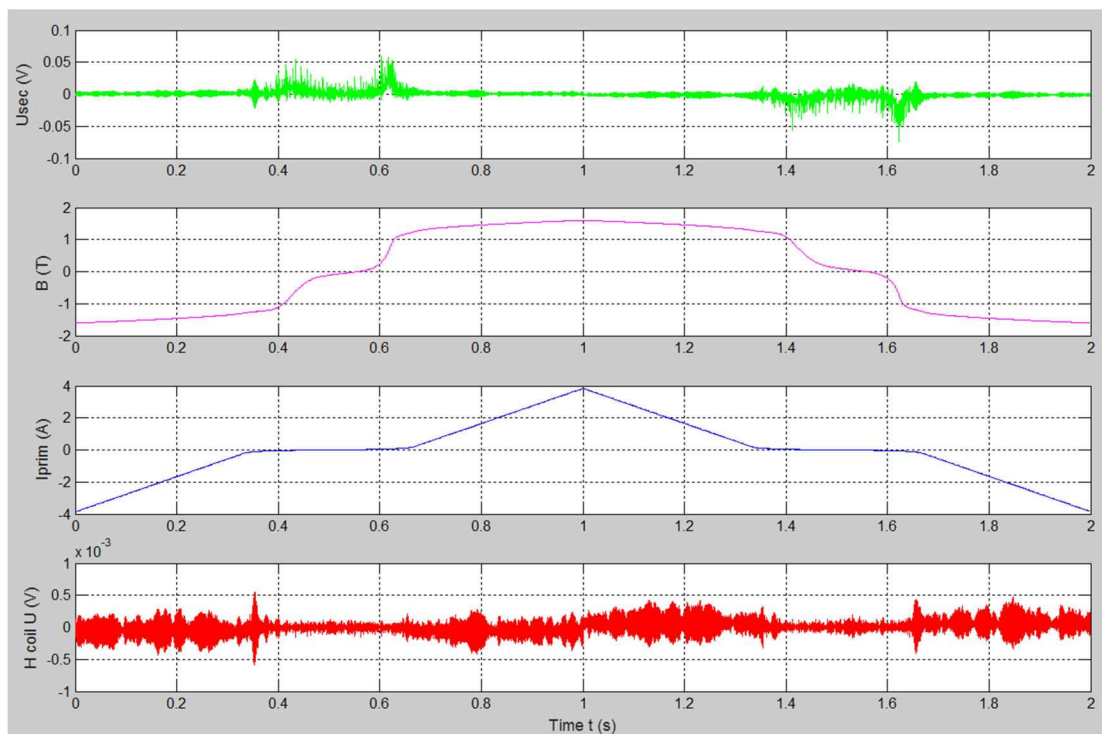
Obrázek 34 Hysterezní smyčka vzorku č. 2

3.3 Vzorek č. 3 měřen ve směru nesnadného magnetování

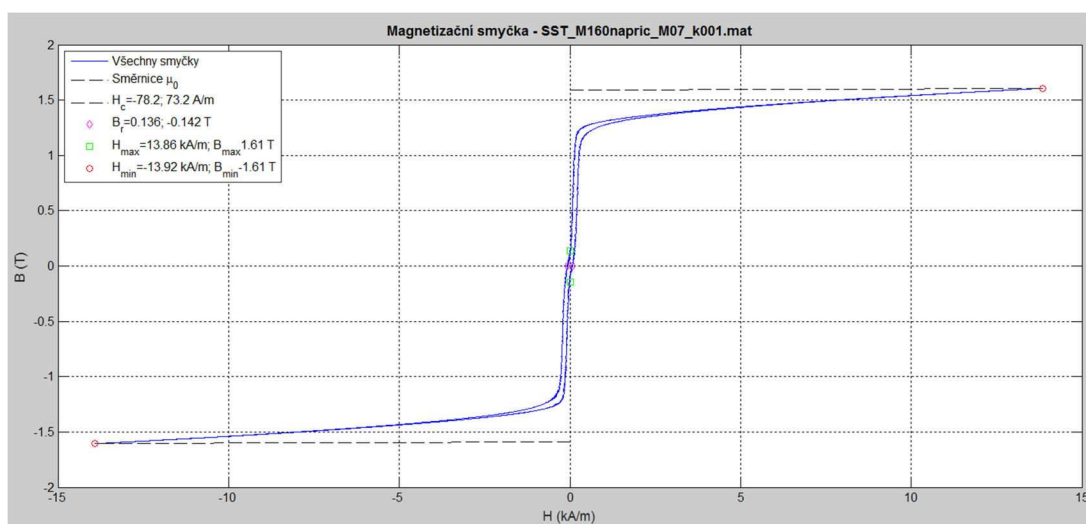
Na obrázku níže jsou zobrazeny časové průběhy měřených a vypočtených veličin na vzorku č. 3, který je střížen ve směru nesnadného magnetování. První je průběh napětí na snímací B-cívce, druhý je vypočítaný průběh magnetické indukce, třetí je magnetizační proud a poslední průběh je napětí na H-cívce. K čemu slouží a co značí jednotlivé průběhy je popsáno v kapitole 3.1.

Na obrázku 36 je zobrazena hysterezní křivka materiálu č. 3. Tento materiál je střížen ve směru nesnadného magnetování, proto je jeho křivka velmi odlišná. Na grafu jsou opět vyznačeny důležité body křivky. Koercitivní síla H_c je víc než dvakrát větší než u plechu střížených ve směru snadného magnetování. Remanentní indukce je desetkrát menší než u předchozích dvou materiálů. Maximum a minimum magnetické indukce B je nižší o 0,3 T oproti předchozím materiálům.





Obrázek 35 Časový průběh signálů na vzorku č. 3, první průběh je napětí na B-cívce, druhý průběh je intenzita magnetické indukce, třetí je průběh proudu magnetizační cívky a poslední je napětí na H-cívce.



Obrázek 36 hysterezní smyčka vzorku č. 3



Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval návrhem a realizací systému pro měření magnetických vlastností feromagnetických materiálů. Nejprve jsem se seznámil s principem měření vlastností pomocí single sheet testeru. Normovaný SST má mnoho modifikací, proto jsem provedl rešerši, ve které uvádím vybrané parametry, jako jsou rozměry jader, geometrie přístroje, počty závitů cívek a další. Rešerše je shrnuta do dvou tabulek.

Dále se zabývám vlastním návrhem single sheet testeru. Parametry navrženého prototypu vycházejí z předchozí rešerše. Rozměry prototypu umožňují měřit proužky plechů o rozměrech 80×30×0,35 mm. Magnetizační cívky, o 180 závitěch, jsou v této modifikaci umístěny na jádrech. Snímací cívky, o 65 závitěch, jsou umístěny na vzorku. Držáky cívek a stojan celého systému je vyroben ze sklolaminátu.

Pro napájení magnetizační cívky byl navržen prototyp výkonového zesilovače. Výkonový zesilovač je postaven na operačním zesilovači OPA549. Výstup zesilovače lze omezit pomocí rezistoru, v tomto prototypu je výstupní proud omezen na 5 A. Zesilovač pracuje v proudovém režimu a lze přepínat mezi invertujícím a neinvertujícím výstupem. Zesilovač je napájen spínanými zdroji. Mezi zdroje a zesilovač je vložen vysokofrekvenční filtr, který odstraňuje vysokofrekvenční šum. Celá tato elektronika je vložena do krabice.

Na systému byla provedena měření tří vzorků pro zjištění funkčnosti systému. Celý systém je plně funkční. Výsledky měření jsou uvedeny v poslední kapitole. Pro zjištění velikosti H byl při měření použit výpočet, protože signál z H -cívky je zatížen šumem. Tester v zapojení se zesilovačem je schopen dosáhnout intenzity magnetického pole až 14 kA/m.

V budoucnu by bylo vhodné vytvořit nové snímací cívky s větším počtem závitů. Tím by se mělo dosáhnout menšího zarušení signálu a to hlavně v případě H -cívky. Pro zlepšení měření by bylo dále vhodné vytvořit napěťový filtr, který by odstranil z napájení nižší frekvence rušení, které vznikají při snížení odběru ze spínaných zdrojů.



Literatura

- [1] Yusuke Takara, Koji Fujiwara, Yoshiyuki Ishihara, Toshiyuki Todaka, A measurement method of the magnetic properties of magnetic sheet by means of a single sheet tester at audio frequency, In Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 320, Issue 20, 2008, Pages e599-e603, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.145>.
- [2] Z. Gmyrek, M. Strąkowska, B. Więcek, A method of local magnetic loss determination in punched ferromagnetic strips, In Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 355, 2014, Pages 282-288, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.12.035>.
- [3] T Nakata, Y Ishihara, M Nakaji, T Todaka, Comparison between the H-coil method and the magnetizing current method for the single sheet tester, In Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volumes 215–216, 2000, Pages 607-610, ISSN 0304-8853, [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(00\)00239-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)00239-0).
- [4] G.H. Shirkoohi, A.S. Kontopoulos, Computation of magnetic field in Rogowski-Chattock potentiometer (RCP) compensated magnetic testers, In Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 133, Issues 1–3, 1994, Pages 587-590, ISSN 0304-8853, [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(94\)90629-7](https://doi.org/10.1016/0304-8853(94)90629-7).
- [5] Marc De Wulf, Dimitre Makaveev, Yvan Houbaert, Jan Melkebeek, Design and calibration aspects of small size single sheet testers, In Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volumes 254–255, 2003, Pages 70-72, ISSN 0304-8853, [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00756-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00756-4).
- [6] T. Nakata, Y. Ishihara, Y. Kamijyo, T. Nagai, F. Kogiku, Y. Tani, K. Yago, Intercomparison of a single sheet tester for amorphous alloys by round robin measurements in Japan, In Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 160, 1996, Pages 119-122, ISSN 0304-8853, [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(96\)00130-8](https://doi.org/10.1016/0304-8853(96)00130-8).
- [7] K. Hergli, H. Marouani, M. Zidi, Yasser Fouad, Mohamed Elshazly, Identification of Preisach hysteresis model parameters using genetic algorithms, Journal of King Saud University - Science, Available online 2 December 2017, ISSN 1018-3647, <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.11.005>.
- [8] T. Nakata, K. Fujiwara, M. Nakano and T. Kayada, "Influence of Yoke Construction on Magnetic Characteristics of Single Sheet Testers," in *IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan*, vol. 5, no. 7, pp. 618-624, July 1990.
doi: 10.1109/TJMJ.1990.4564151



- [9] D. Miyagi, T. Yamazaki, D. Otome, M. Nakano and N. Takahashi, "Development of Measurement System of Magnetic Properties at High Flux Density Using Novel Single-Sheet Tester," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 10, pp. 3889-3892, Oct. 2009. doi: 10.1109/TMAG.2009.2022332
- [10] M. De Wulf, L. Dupre, H. te Lintelo and J. Melkebeek, "Characterization of soft magnetic thin film by means of single sheet testing," *Digest of INTERMAG 2003. International Magnetics Conference (Cat. No.03CH37401)*, Boston, MA, USA, 2003, pp. EP-04. doi: 10.1109/INTMAG.2003.1230588
- [11] D. Miyagi, D. Otome, M. Nakano and N. Takahashi, "Measurement of Magnetic Properties of Nonoriented Electrical Steel Sheet at Liquid Nitrogen Temperature Using Single Sheet Tester," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 2, pp. 314-317, Feb. 2010. doi: 10.1109/TMAG.2009.2033551
- [12] O. de la Barrière, C. Ragusa, M. Khan, C. Appino, F. Fiorillo and F. Mazaleyrat, "A Simple Compensation Method for the Accurate Measurement of Magnetic Losses With a Single Strip Tester," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 5, pp. 1-4, May 2016. doi: 10.1109/TMAG.2016.2527829
- [13] D. Miyagi, K. Miki, M. Nakano and N. Takahashi, "Influence of Compressive Stress on Magnetic Properties of Laminated Electrical Steel Sheets," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 2, pp. 318-321, Feb. 2010. doi: 10.1109/TMAG.2009.2033550
- [14] T. Nakase, M. Nakano, K. Fujiwara and N. Takahashi, "Measuring system for magnetostriction of silicon steel sheet under AC excitation using optical methods," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 4, pp. 2072-2074, Jul 1998. doi: 10.1109/20.706800
- [15] Z. Gmyrek and A. Cavagnino, "Modified single sheet tester system for engineering measurements," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, 2016, pp. 1902-1908. doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732783
- [16] M. Hofmann, D. Kahraman, H. G. Herzog and M. J. Hoffmann, "Numerical Determination of the Effective Magnetic Path Length of a Single-Sheet Tester," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, pp. 929-932, Feb. 2014. doi: 10.1109/TMAG.2013.2283499



- [17] Z. Gmyrek, "Single Sheet Tester With Variable Dimensions," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 7, pp. 1661-1668, July 2016.
doi: 10.1109/TIM.2016.2540839
- [18] H. Hagihara, M. Tanaka, Y. Takahashi, K. Fujiwara and Y. Ishihara, "Standard Measurement Method for Magnetic Properties of Fe-Based Amorphous Magnetic Materials," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 4, pp. 1-4, April 2014.
doi: 10.1109/TMAG.2013.2286620
- [19] Liu Shuo, Liu Zhiqiang, Wang Yong, Liu Fugui and Yan Weili, "Study of single sheet tester for AC magnetization characteristics measurement," *Electrical Machines and Systems, 2001. ICEMS 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on*, Shenyang, 2001, pp. 361-364 vol.1. doi: 10.1109/ICEMS.2001.970687
- [20] R. Watakabe, M. Tanaka, Y. Takahashi, K. Fujiwara, Y. Ishihara and D. Azuma, "Study on Standard Measurement Method of Magnetic Property of Fe-Based Amorphous Strip—Round Robin Test Results," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 5, pp. 1-4, May 2016. doi: 10.1109/TMAG.2016.2518209
- [21] T. Nakata, M. Nakano, K. Fujiwara and T. Kayada, "Various Factors Affecting Eddy Current Distribution of Single Sheet Testers," in *IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan*, vol. 6, no. 6, pp. 501-507, June 1991.
doi: 10.1109/TJM.1991.4565197
- [22] Texas Instruments, OPA549. *Datasheet* [online]. 2005, 19 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa549.pdf>
- [23] Mean Well, LRS-100-24. *Datasheet* [online]. 2015, 5 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/ds/2/260/lrs-100-spec-752931.pdf>
- [24] DUFEK, Milan, Jaroslav HRABÁK a Zdeněk TRNKA. *Magnetická měření*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [25] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. *Magnetické prvky a měření*. Vyd. 3. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03970-0.
- [26] TUMAŃSKI, Sławomir. *Handbook of magnetic measurements*. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978--4398-2951-6.



Přílohy

Na přiloženém CD je ve složce „Písemná práce“ umístěna diplomová práce ve formátu PDF. Ve složce „EAGLE“ jsou umístěny výrobní data plošných spojů. Ve složce „AutoCAD“ jsou umístěny výrobní data koster cívek a stojanu SST. Ve složce „Měření“ je umístěn skript pro měření hysterezní křivky a data z provedených měření.

