



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

**MĚŘENÍ A ZÁZNAM POČÁTEČNÍ
MAGNETIZAČNÍ KŘIVKY A HYSTEREZNÍ
KŘIVKY FEROMAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ**

MEASUREMENT AND RECORDING OF THE INITIAL MAGNETIZATION CURVE AND
HYSTERESIS CURVE OF FERROMAGNETIC MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Quoc Bao Tran

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Klvač

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Quoc Bao Tran

ID: 221286

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Měření a záznam počáteční magnetizační křivky a hysterezní křivky feromagnetických materiálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami měření vlastností feromagnetických materiálů. Připravte pracoviště pro měření a záznam počáteční magnetizační křivky a hysterezní křivky feromagnetických materiálů v oblasti nízkých frekvencí

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 2.6.2022

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Klvač

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá měřením křivky prvotní magnetizace a hysterezní křivky. Práce je rozdělena na dvě části, a to na teoretickou část a praktickou část. V teoretické části je popsán vznik magnetického pole v látkách, vybuzení magnetického pole elektrickým proudem nebo také vybuzení elektrického proudu změnou magnetického pole. Dále se v praktické části práce zaměřuje na návrh, konstrukce a testování zesilovače a na samotné měření a zobrazení hysterezní smyčky. V závěru je shrnuto, jakých výsledků bylo dosaženo.

Klíčová slova

Cívka, transformátorové plechy, hysterezní smyčka, magnetické pole, koercitivní síla, feromagnetikum, stejnosměrný posuv, operační zesilovač

Abstract

This thesis deals with the measurement of primary magnetization curves and hysteresis loop. The thesis is divided into two parts, the theoretical part and the practical part. The theoretical part describes the creation of magnetic field in materials, excitation of magnetic field by electric current or excitation of electric current by changing magnetic field. The practical part is focused on designing, construction and testing of amplifier and the measurement and displaying of hysteresis loop. In the end of the thesis is summarized what results were achieved.

Keywords

Inductor, transformer steel, hysteresis curve, magnetic field, coercivity, ferromagnetic material, offset, operational amplifier

Bibliografická citace

TRAN, Quoc Bao. *Měření a záznam počáteční magnetizační křivky a hysterezní křivky feromagnetických materiálů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142758>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ondřej Klvač.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Quoc Bao Tran</i>
VUT ID studenta:	<i>221286</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Měření a záznam počáteční magnetizační křivky a hysterezní smyčky feromagnetických materiálů</i>

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

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

V Brně dne: 2. června 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Ondřeji Klvačovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Také děkuji Ondřeji Pokornému za dobré praktické rady a Ing. Jiřímu Pospíšilíkovi, Ph.D. za propůjčení studijních zdrojů, jež byly použity v této semestrální práci.

V Brně dne: 2. června 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
ÚVOD.....	11
1. TEORETICKÁ ČÁST	12
1.1 MAGNETICKÉ POLE CÍVKY	12
1.1.1 <i>Vznik magnetického pole v látkách.....</i>	<i>12</i>
1.1.2 <i>Vznik magnetického pole kolem vodiče a cívky.....</i>	<i>12</i>
1.1.3 <i>Indukce elektrického napětí a proudu v cívce</i>	<i>14</i>
1.1.4 <i>Energie magnetického pole cívky.....</i>	<i>15</i>
1.2 VELIČINY MAGNETICKÉHO POLE	15
1.2.1 <i>Magnetická indukce.....</i>	<i>15</i>
1.2.2 <i>Magnetický indukční tok.....</i>	<i>16</i>
1.2.3 <i>Magnetická susceptibilita a permeabilita.....</i>	<i>16</i>
1.2.4 <i>Intenzita magnetického pole</i>	<i>16</i>
1.3 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ PODLE CHOVÁNÍ V MAGNETICKÉM POLI	17
1.3.1 <i>Diamagnetické materiály.....</i>	<i>17</i>
1.3.2 <i>Paramagnetické materiály.....</i>	<i>17</i>
1.3.3 <i>Feromagnetické materiály.....</i>	<i>18</i>
1.3.4 <i>Antiferomagnetické materiály.....</i>	<i>19</i>
1.3.5 <i>Ferimagnetické materiály.....</i>	<i>19</i>
1.4 KŘIVKY POPISUJÍCÍ MAGNETICKÉ MATERIÁLY	20
1.4.1 <i>Křivka prvotní magnetizace</i>	<i>20</i>
1.4.2 <i>Hysterezní smyčka.....</i>	<i>21</i>
1.4.3 <i>Komutační křivka</i>	<i>22</i>
1.5 DĚLENÍ MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ DLE VYUŽITÍ	22
1.5.1 <i>Magneticky měkké materiály.....</i>	<i>22</i>
1.5.2 <i>Magneticky tvrdé materiály</i>	<i>23</i>
1.5.3 <i>Ztráty ve feromagnetických materiálech.....</i>	<i>24</i>
1.6 METODY MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ	25
1.6.1 <i>Indukční metody.....</i>	<i>25</i>
1.6.2 <i>Hallova sonda.....</i>	<i>26</i>
1.6.3 <i>Metody měření hysterezních smyček.....</i>	<i>26</i>
2. PRAKTICKÁ ČÁST.....	29
2.1 METODA MĚŘENÍ	29
2.1.1 <i>Měření hysterezní smyčky jádra z lisovaných transformátorových plechů</i>	<i>30</i>
2.1.2 <i>Zjištění velikosti offsetu a jeho následné řešení</i>	<i>32</i>
2.1.3 <i>Měření hysterezní smyčky litého jádra</i>	<i>33</i>
2.2 NÁVRH ZESILOVAČE.....	36
2.2.1 <i>Testování zesilovače na univerzální DPS</i>	<i>37</i>
2.2.2 <i>Návrh a výroba DPS zesilovače</i>	<i>39</i>
2.3 NAPÁJECÍ ZDROJ PRO ZESILOVAČ	39
2.3.1 <i>Nastavení výstupního napětí</i>	<i>40</i>
2.4 FINÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	41
2.4.1 <i>Řízení ventilátorů</i>	<i>43</i>

2.5	TESTOVÁNÍ KOMPLETNÍHO ZAŘÍZENÍ	44
2.5.1	<i>Měření hysterzní smyčky litého jádra s finálním zařízením.....</i>	<i>46</i>
ZÁVĚR.....	47
LITERATURA.....	49
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	51
SEZNAM PŘÍLOH.....	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Ampérovo pravidlo pravé ruky [4].....	12
Obrázek 1.2: magnetické pole závitů (dvou paralelních vodičů) [4].....	13
Obrázek 1.3: magnetické pole válcové cívky [5].....	13
Obrázek 1.4: magnetické pole toroidní cívky [4].....	14
Obrázek 1.5: směr magnetických momentů v diamagnetikách [4]	17
Obrázek 1.6: směr magnetických momentů v paramagnetikách [12].....	17
Obrázek 1.7: Bethova křivka [10].....	18
Obrázek 1.8: doménová struktura bez působení a s působením magnetického pole [2].....	18
Obrázek 1.9: orientace magnetických spinových momentů antiiferomagnetik [10].....	19
Obrázek 1.10: uspořádání magnetických momentů feromagnetik [12]	19
Obrázek 1.11: křivky prvotní magnetizace různých typů materiálů [1]	20
Obrázek 1.12: křivka prvotní magnetizace feromagnetika [1].....	20
Obrázek 1.13: široká a úzká hysterezní smyčka [12]	21
Obrázek 1.14: komutační křivka [12].....	22
Obrázek 1.15: izotropní struktura a anizotropní struktura [1].....	23
Obrázek 1.16: feromagnetická sonda [16].....	25
Obrázek 1.17: Hallova sonda [16]	26
Obrázek 1.18: měření na uzavřeném vzorku [16]	27
Obrázek 1.19: blokové zapojení hysterezigrafu [16].....	28
Obrázek 1.20: zapojení měření hysterezní smyčky pomocí osciloskopu [16]	28
Obrázek 2.1: měřicí stanoviště.....	29
Obrázek 2.2: schéma měřicího stanoviště [18]	30
Obrázek 2.3: časový průběh proudu primární cívky.....	30
Obrázek 2.4: časový průběh napětí naprázdno na sekundární cívce	31
Obrázek 2.5: výsledek integrace napětí U_{B1}	31
Obrázek 2.6: hysterezní smyčka lisovaných transformátorových plechů před korekcí offsetu.....	32
Obrázek 2.7: hysterezní smyčka transformátorových plechů po korekci offsetu.....	33
Obrázek 2.8: hysterezní smyčka litého jádra při $f = 0,1$ Hz a $U = 2$ V.....	33
Obrázek 2.9: zobrazení zákmitů při zvýšení výstupního napětí generátoru.....	34
Obrázek 2.10: výstupní napětí generátoru bez připojené zátěže	34
Obrázek 2.11: zobrazení zákmitů při připojené zátěži	35
Obrázek 2.12: křivka prvotní magnetizace s připojeným laboratorním zdrojem	35
Obrázek 2.13: schéma zapojení neinvertujícího zesilovače s OZ LM3886T	36
Obrázek 2.14: zesílený vstupní signál	37
Obrázek 2.15: hysterezní smyčka po zesílení vstupního signálu	38
Obrázek 2.16: schéma zesilovače	38
Obrázek 2.17: leptání DPS	39
Obrázek 2.18: výsledná DPS	39
Obrázek 2.19: schéma symetrického zdroje	40
Obrázek 2.20: schéma pro nastavení výstupního napětí.....	41
Obrázek 2.21: umístění banánkových zdírek.....	41
Obrázek 2.22: umístění rezistoru $100 \Omega/10$ W	42
Obrázek 2.23: celkové zapojení.....	42

Obrázek 2.24: výdech teplého vzduchu.....	42
Obrázek 2.25: schéma teplotního snímače	43
Obrázek 2.26: umístění NTC termistoru v chladiči a stabilizátoru 7812.....	43
Obrázek 2.27: omezení proudu tekoucího do primární cívký	44
Obrázek 2.28: projevení omezeného proudu na hysterezní smyčce	44
Obrázek 2.29: umístění výstupních rezistorů.....	45
Obrázek 2.30: hysterezní smyčka po vyřešení komplikací.....	46

ÚVOD

Tato práce je zaměřena na měření a zobrazení hysterezní smyčky zadanou měřicí metodou. Avšak je nejprve potřeba znát teorii o vzniku magnetického pole v látkách nebo, jak vzniká magnetické pole kolem cívky. Také je nutné vědět, jaké existují materiály z pohledu chování v magnetickém poli a jaké jsou z praktického hlediska využitelné.

Hysterezní smyčka je velmi důležitá křivka feromagnetických materiálů. Podle ní je možné určit základní vlastnosti daného feromagnetika jako např. remanentní indukce, koercitivní síla a hysterezní ztráty daného feromagnetického materiálu. Hysterezní ztráty jsou úměrné ploše dané hysterezní smyčky a tyto ztráty zahřívají feromagnetikum při střídavém magnetování. Pomocí zobrazení hysterezní smyčky určitou měřicí metodou lze testovat jádra transformátorů, tzn. jejich vhodnost pro použití z pohledu hysterezních ztrát, které jsou určeny plochou hysterezní smyčky.

V této práci jsou zkoumány hysterezní smyčky dvou feromagnetických jader, kdy jedno jádro je vyrobeno z lisovaných z transformátorových plechů a druhé jádro je litý vzorek. Měřicí stanoviště se skládá z výkonového generátoru, zmíněných feromagnetických jader, dvou cívek a měřicí stanice CASSY. Obě jádra jsou sycena trojúhelníkovým signálem. Měření a následné zobrazení hysterezní smyčky jádra z transformátorových plechů proběhlo bez komplikací. Při zobrazení hysterezní smyčky litého jádra je patrné, že výkonový generátor není dostatečně výkonný pro nasycení tohoto jádra. Je tedy na místě navrhnout nový zdroj, který bude dostatečně výkonný pro bezchybné vykreslení hysterezní smyčky. V této práci je popsán návrh, konstrukce a testování zesilovače zesilující trojúhelníkový signál generovaný z výkonového generátoru.

1. TEORETICKÁ ČÁST

V této části je popsána podstata vzniku magnetického pole, jak vzniká magnetické pole v důsledku průchodu proudu vodičem a také jak je možno indukovat elektrické napětí a proud pomocí magnetického pole. Zde jsou také popsány veličiny charakterizující chování a vlastnosti materiálů v magnetickém poli.

1.1 Magnetické pole cívky

1.1.1 Vznik magnetického pole v látkách

Všechny látky jsou složeny z atomů. Atomy jsou složeny z jádra, ve kterém se nachází protony a neutrony, a elektronového obalu obsahující elektrony obíhající kolem jádra. Pohyb elektronu v atomu je charakterizován spinovým magnetickým momentem, který charakterizuje spin, a dráhovým magnetickým momentem, tj. pohybem kolem jádra atomu v orbitalech. Orbitaly jsou oblasti, kde se s vysokou pravděpodobností v daný okamžik nachází elektron. Vektorový součet dráhových magnetických momentů a spinových magnetických momentů všech elektronů je výsledný magnetický moment atomu charakterizující vlastnosti a chování látky ve vnějším magnetickém poli [1][2][3].

Elektrony mají elektrický náboj a víme, že pohybující se náboj vytváří magnetické pole. Dá se tedy říci, že všechny látky jsou magnetické, avšak dráhové magnetické momenty elektronů mají odlišnou orientaci v prostoru, tudíž se vyruší. Většina atomů má také vykompenzované spinové magnetické momenty, tzn., že v orbitalu existují spárované elektrony s opačnou polaritou spinu. Ve výsledku se většina látek chová jako nemagnetická. Může nastat situace, kdy v orbitalech některých atomů existují nespárované elektrony, tudíž nedochází ke kompenzaci spinových magnetických momentů elektronů a také nedojde ke kompenzaci dráhových magnetických momentů a tyto atomy generují vlastní magnetický moment [1][2].

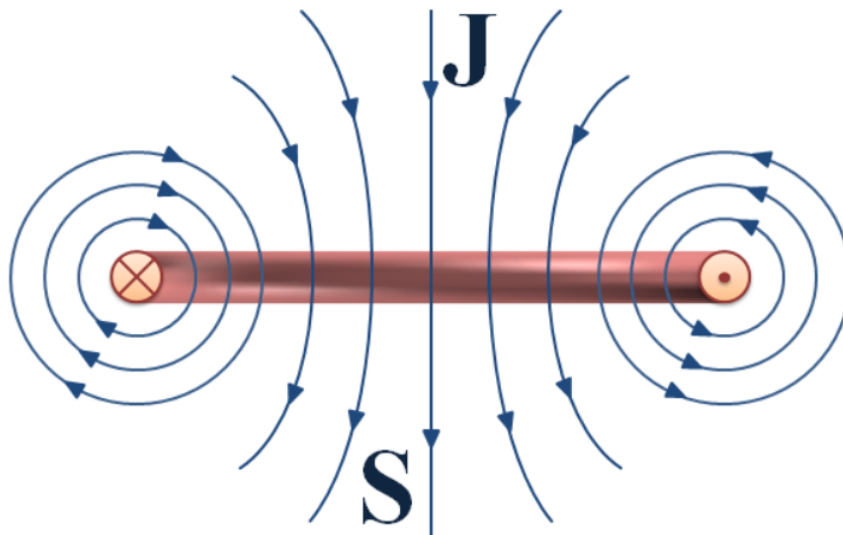
1.1.2 Vznik magnetického pole kolem vodiče a cívky

Pokud máme přímý vodič, kterým protéká elektrický proud, což je pohyb elektronů, vzniká kolem tohoto vodiče magnetické pole, jenž lze zobrazit pomocí magnetických indukčních čar. Magnetické indukční čáry jsou vždy uzavřené křivky. Směr magnetických siločar v přímém vodiči můžeme určit pomocí Ampérova pravidla pravé ruky. Palec ukazuje směr proudu a zbylé prsty ukazují směr magnetických siločar [6].



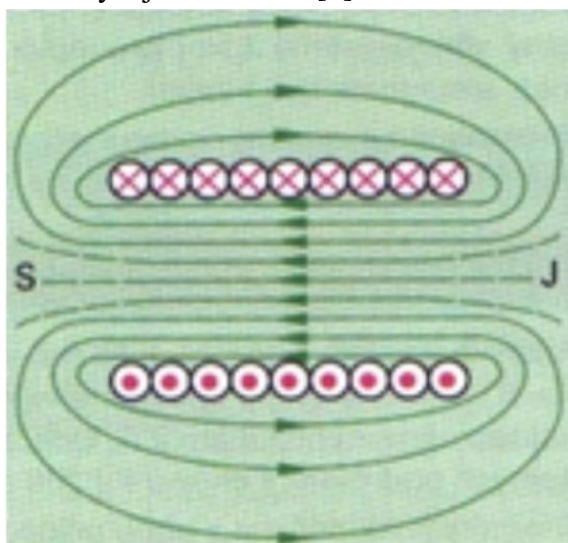
Obrázek 1.1: Ampérovo pravidlo pravé ruky [4]

Můžeme z vodiče vytvořit závit a tuto situaci je možné si představit jako dva vodiče vedle sebe. Pomocí Ampérova pravidla pravé ruky lze určit, jak bude vypadat výsledné magnetické pole těchto dvou vodičů.



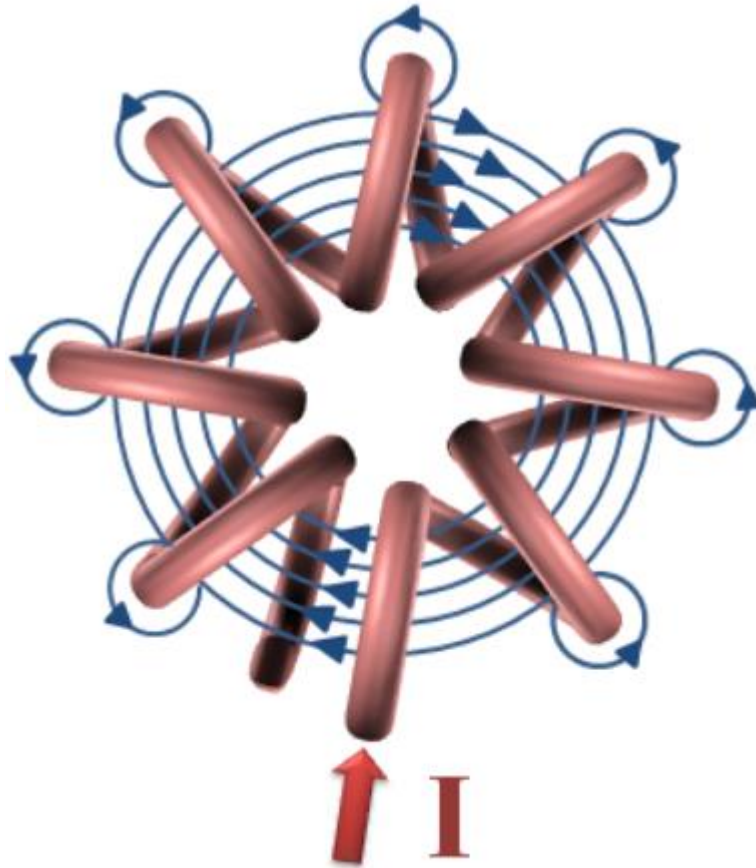
Obrázek 1.2: magnetické pole závitu (dvou paralelních vodičů) [4]

Z obrázku 1.2 je patrné, že magnetické pole závitu připomíná magnetické pole permanentního magnetu. V případě, že vodič bude složen z více závitů vznikne válcová cívka, také nazývána solenoid, ve které se nasčítají magnetické siločáry jednotlivých závitů, a při průchodu proudem cívkou bude vygenerované magnetické pole silnější než ve vodiči s jedním závitem. Cívka má stejně jako permanentní magnet severní a jižní pól. Umístění pólů lze určit pomocí pravidla pravé ruky, kdy prsty ukazují směr elektrického proudu a palec ukazuje severní pól cívky. Vně cívky magnetické siločáry jsou směřovány ze severu k jihu a uvnitř cívky z jihu na sever [6].



Obrázek 1.3: magnetické pole válcové cívky [5]

Vodič elektrického proudu lze namotat i jiným způsobem, a to do tvaru prstence. Této cívce říkáme toroid. Tato cívka se vine na prstencové jádro. Při průchodu elektrického proudu toroidem se magnetické pole vytváří hlavně uvnitř toroidu, kde magnetické siločáry mají tvar kružnic, tedy toroid nevytváří severní a jižní pól, a vně toroidu se vytváří minimální část magnetického pole [6].



Obrázek 1.4: magnetické pole toroidní cívky [4]

1.1.3 Indukce elektrického napětí a proudu v cívce

Je tedy známo, že elektrickým proudem je možné vytvořit magnetické pole. Platí i opačný vztah. Pokud máme zdroj magnetického pole a cívku pohybujeme v magnetickém poli nebo manipulujeme s magnetickým polem kolem cívky, vytvoří se změna magnetického pole v čase a naindukuje se elektrické napětí dle Faradayova zákona elektromagnetické indukce.

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt} [V; Wb, s], \quad (1.1)$$

kde Φ je magnetický tok a t je čas. Z tohoto vztahu lze vyčíst, že čím je větší změna magnetického toku v čase, tím se naindukuje větší napětí na cívce. Indukované napětí vyvolává indukovaný proud generující magnetický tok působící proti magnetickému

toku, který ho vyvolal dle Lenzova zákona. Znamená to, že se cívka snaží udržet předchozí stav a brání se tedy změnám [6].

Charakteristickým parametrem popisující cívku je indukčnost. Indukčnost je závislá na počtu závitů N cívky, permeabilitě materiálu jádra μ , obsahu průřezu cívky S , délce cívky l a magnetickém toku Φ a elektrickém proudu I procházející cívku, který daný magnetický tok vyvolal. Indukčnost se značí L a jednotka je Henry [H]. Indukčnost je v podstatě schopnost cívky vytvářet magnetické pole. Indukčnost cívky lze zesílit vložením typicky železného jádra, které má vyšší relativní permeabilitu než vzduch.

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu \cdot N^2}{l_c} \cdot S_c [H; Wb, A, H/m, -, m, m^2] \quad (1.2)$$

Pokud dosadíme tento vztah do Faradayova zákona elektromagnetické indukce, výsledkem je vztah o indukovaném napětí v cívce.

$$U_i = -L \cdot \frac{dI}{dt} [V; H, s] \quad (1.3)$$

1.1.4 Energie magnetického pole cívky

Pokud je uzavřený elektrický obvod s cívku a zdrojem elektrického napětí, prochází cívku elektrický proud, který má svou energii. Kolem vodiče a také ve vodiči se nahromadí energie, která je potřeba pro vytvoření magnetického pole. Část energie se vyzařuje ve formě Joulova tepla, ale velká část energie ze zdroje elektrického napětí je spotřebována k vytvoření magnetického pole. Při rozpojení obvodu začne postupně klesat energie magnetického pole a začne se přeměňovat na energii elektrického proudu [6][7].

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot LI^2 [J; H, A] \quad (1.4)$$

1.2 Veličiny magnetického pole

1.2.1 Magnetická indukce

Magnetické pole je obvykle definováno pomocí magnetické indukce. Tato veličina je vektorová, tzn., že má velikost i směr, značí se \mathbf{B} a její jednotka je Tesla [T] [2].

Magnetická indukce vyjadřuje mohutnost silových účinků magnetického pole na elektrický proud dle vztahu

$$B = \frac{F}{I \cdot l \cdot \sin \alpha} [T; N, A, m, -] \quad (1.5)$$

a také popisuje silové působení na pohybující se náboj určitou rychlostí v magnetickém poli dle [2]

$$F = Q \cdot v \times B [N; C, m/s, T]. \quad (1.6)$$

1.2.2 Magnetický indukční tok

Magnetický tok je veličina charakterizující celkový příspěvek magnetické indukce B přes určitou plochu S . Tato veličina je skalární, tzn., že nemá směr, ale pouze velikost. Značí se Φ a její jednotka je Weber [Wb] [6].

Magnetický indukční tok vytvářen pomocí magnetické indukce B lze definovat pomocí vzorce

$$\Phi = \iint_S B \, dS \quad [Wb; T, m^2] \quad (1.7)$$

Pokud je vnější magnetické pole homogenní a vektor magnetické indukce B je kolmý k ploše S , dostaneme vztah [6][13]

$$\Phi = B \cdot S \quad [Wb; T, m^2]. \quad (1.8)$$

1.2.3 Magnetická susceptibilita a permeabilita

Chování materiálů ve vnějším magnetickém poli je možno popsat pomocí permeability a magnetické susceptibility. Permeabilita se značí μ , její jednotka je [H/m] a magnetická susceptibilita se značí χ_m , která je bezrozměrná [8].

Permeabilitu lze vypočítat pomocí vzorce

$$\mu = \frac{B}{H} \quad [H/m; T, A/m], \quad (1.9)$$

kdy μ_r je relativní permeabilita a μ_0 je permeabilita vakua, která je konstanta, tedy $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

S relativní permeabilitou právě úzce souvisí magnetická susceptibilita dle

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad [-], \quad (1.10)$$

a proto je i relativní permeabilita bezrozměrná veličina [6][8].

1.2.4 Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole charakterizuje silové působení magnetického pole. Je to vektorová veličina, která se značí \mathbf{H} a její jednotka je Ampér na metr [A/m]. Obecný vztah pro výpočet intenzity magnetického pole je [9]

$$H = \frac{I}{l} \quad [A/m; A, m]. \quad (1.11)$$

Při průchodu elektrického proudu přímým vodičem vytvoří magnetické indukční čáry kružnice. Intenzita magnetického pole je stejná po celé délce magnetické indukční čáry ve vzdálenosti r od osy vodiče [6]

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad [A/m; A, m]. \quad (1.12)$$

Mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole platí vztah [6]

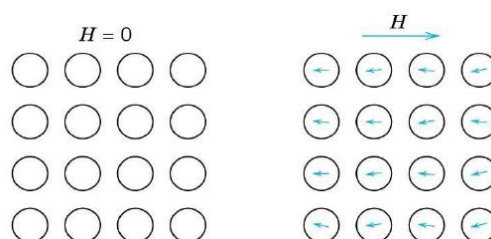
$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad [T; H/m, -, A/m], \quad (1.13)$$

1.3 Rozdělení materiálů podle chování v magnetickém poli

1.3.1 Diamagnetické materiály

Materiály obsahující atomy s nulovým výsledným magnetickým momentem se nazývají diamagnetika. Je to zapříčiněno tím, že tyto atomy mají vykompenzované dráhové magnetické momenty a vykompenzované spinové magnetické momenty. Tyto atomy mají tedy zaplněné elektronové orbity [7][10].

Po vložení diamagnetického materiálu do vnějšího magnetického pole se pozmění dráhy elektronů, indukují magnetické dipóly, jejichž magnetické pole působí proti vnějšímu magnetickému poli, jak je zobrazeno na obrázku 1.5. Ve výsledku je vnější magnetické pole zeslabováno, a proto je $\mu_r < 1$. Charakteristickou vlastností těchto materiálů je odpuzování vnějším magnetickým polem. Mezi diamagnetika se řadí zlato, uhlík, olovo, měď a síra [7][8].

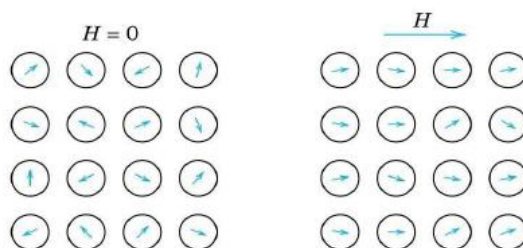


Obrázek 1.5: směr magnetických momentů v diamagnetikách [4]

1.3.2 Paramagnetické materiály

V atomech těchto materiálů existují nespárované elektrony, což znamená, že orbitály nejsou plně obsazeny. Atomy tedy generují své magnetické pole a výsledný magnetický moment není nulový [7][8].

Bez účinku vnějšího magnetického pole jsou magnetické momenty atomů orientovány nahodile, a proto se navenek materiál jeví jako nemagnetický. Po vložení paramagnetika do vnějšího magnetického pole se magnetické dipóly natáčí ve směru magnetického pole a dojde k mírnému zesílení vnějšího magnetického pole, a proto je $\mu_r > 1$. Paramagnetické materiály jsou mírně přitahovány vnějším magnetickým polem a po odebrání paramagnetika z vnějšího magnetického pole se magnetické momenty jednotlivých atomů vrátí do původního stavu a materiál se opět jeví jako nemagnetický (viz obrázek 1.6). Mezi paramagnetika patří hliník, mangan, chrom a platina [1][7].

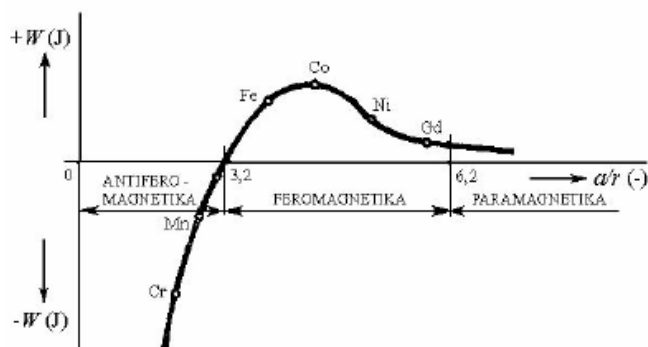


Obrázek 1.6: směr magnetických momentů v paramagnetikách [12]

1.3.3 Feromagnetické materiály

Atomy ve feromagnetických materiálech mají nevykompenzované spinové magnetické momenty a vykazují spontánní magnetizaci [10][12].

Ve feromagnetických materiálech existuje tzv. vnitřní molekulární pole, kdy jde o to, že elektrony sousedních atomů působí na sebe tzv. výměnnými silami. Velikost výměnných sil závisí na vzdálenosti atomů „a“ a poloměru vnitřní neúplně obsazené hladině „r“. Poměr mezi „a“ a „r“ je u feromagnetik větší než 3 ($a/r > 3$). Výměnná energie feromagnetických materiálů je kladná. Závislost mezi a/r a výměnnou energií zobrazuje Bethova křivka (viz obrázek 1.7), která přesně stanovuje hranici mezi antiferomagnetismem a feromagnetismem [11][12].



Obrázek 1.7: Bethova křivka [10]

Magnetické momenty určité skupiny atomů jsou uspořádány paralelně a vytváří magnetickou doménu se svým směrem spontánní magnetizace. Feromagnetikum obsahuje mnoho těchto domén a tvoří doménovou strukturu. Jednotlivé domény jsou odděleny vrstvami, které se nazývají Blochovy stěny. Bez účinku vnějšího magnetického pole jsou směry domén natočeny jinak a navenek se jeví feromagnetický materiál jako nemagnetický. Po vložení feromagnetika dojde k silnému zesílení vnějšího magnetického pole, tzn., že $\mu_r \gg 1$. Magnetické domény se natáčejí podle směru působícího magnetického pole a po odebrání feromagnetika z magnetického pole zůstává remanentní magnetizace. Pokud teplota feromagnetika přesáhne tzv. Curierovu teplotu, materiál ztrácí své feromagnetické vlastnosti a stává se paramagnetickou látkou [1][2][10].

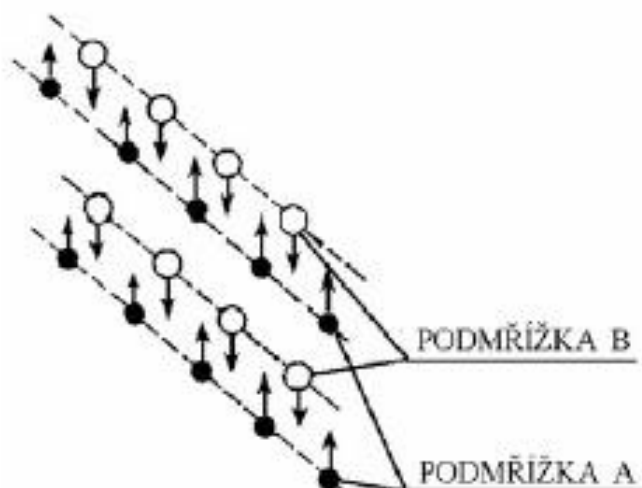


Obrázek 1.8: doménová struktura bez působení a s působením magnetického pole [2]

1.3.4 Antiferomagnetické materiály

Atomy v doménách jsou blízko u sebe a díky tomu výměnné síly zapříčiní antiparalelní uspořádání stejně velkých magnetických spinových momentů (viz obrázek 1.9). Dochází tedy k vyrušení magnetických momentů a navenek se látka jeví jako nemagnetická [12].

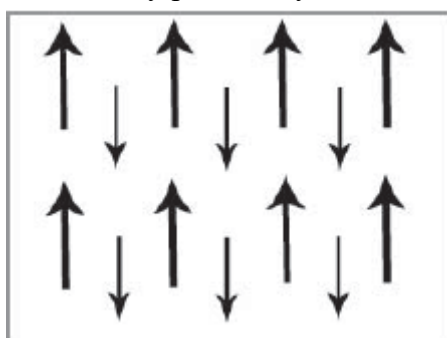
Atomy tvoří dvě podmřížky A a B, kdy atomy z podmřížky A jsou nejbliž k atomům z podmřížky B. Při překročení tzv. Neelovy teploty dojde ke zničení doménové struktury a následně se antiferomagnetikum se chová jako paramagnetický materiál [1][12].



Obrázek 1.9: orientace magnetických spinových momentů antiferomagnetik [10]

1.3.5 Ferimagnetické materiály

Ferimagnetismus je zvláštní případ antiferomagnetismu, kde magnetické spinové momenty jsou taky uspořádány antiparalelně, také tvoří podmřížky, ale jejich magnetické spinové momenty nejsou stejně velké, jak je zobrazeno na obrázku 1.10. Magnetické momenty se nevyruší a látka vykazuje svou magnetizaci. Materiály, které patří do této skupiny, se nazývají ferity. Mezi ferity patří oxidy železa + oxidy jiných kovů [1][12].

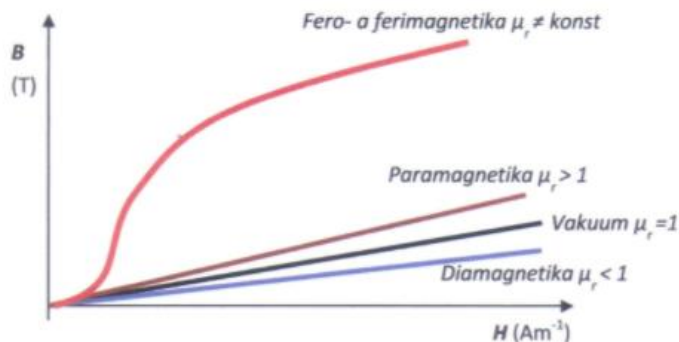


Obrázek 1.10: uspořádání magnetických momentů feromagnetik [12]

1.4 Křivky popisující magnetické materiály

1.4.1 Křivka prvotní magnetizace

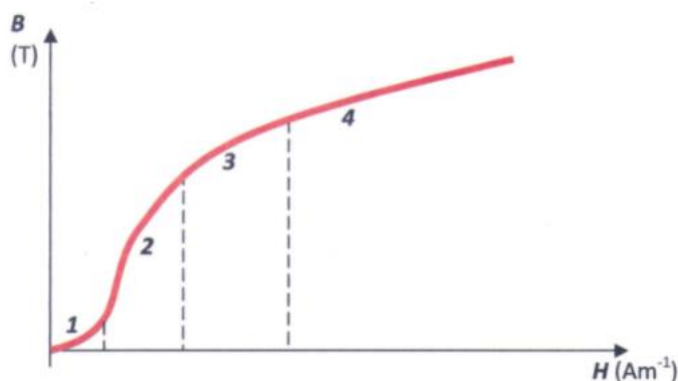
Vztah 1.13 je v podstatě rovnice přímky, kde permeabilita je směrnice dané přímky. Permeabilita diamagnetik a paramagnetik není závislá na intenzitě magnetického pole H , a proto je permeabilita je konstantní, proto křivky prvotní magnetizace jsou přímky.



Obrázek 1.11: křivky prvotní magnetizace různých typů materiálů [1]

U feromagnetika nelze určit jeho permeabilitu jednoznačně, jelikož permeabilita feromagnetického materiálu je závislá na intenzitě magnetického pole. Proto není permeabilita konstantní a křivka prvotní magnetizace feromagnetika zdaleka nepřipomíná přímku [1].

Předpokládáme, že feromagnetikum je magnetováno poprvé, nebo bylo odmagnetováno. Po vložení feromagnetika do vnějšího magnetického pole se materiál začne magnetizovat podle křivky prvotní magnetizace a domény se natáčejí ve směru intenzity magnetického pole [1][7].



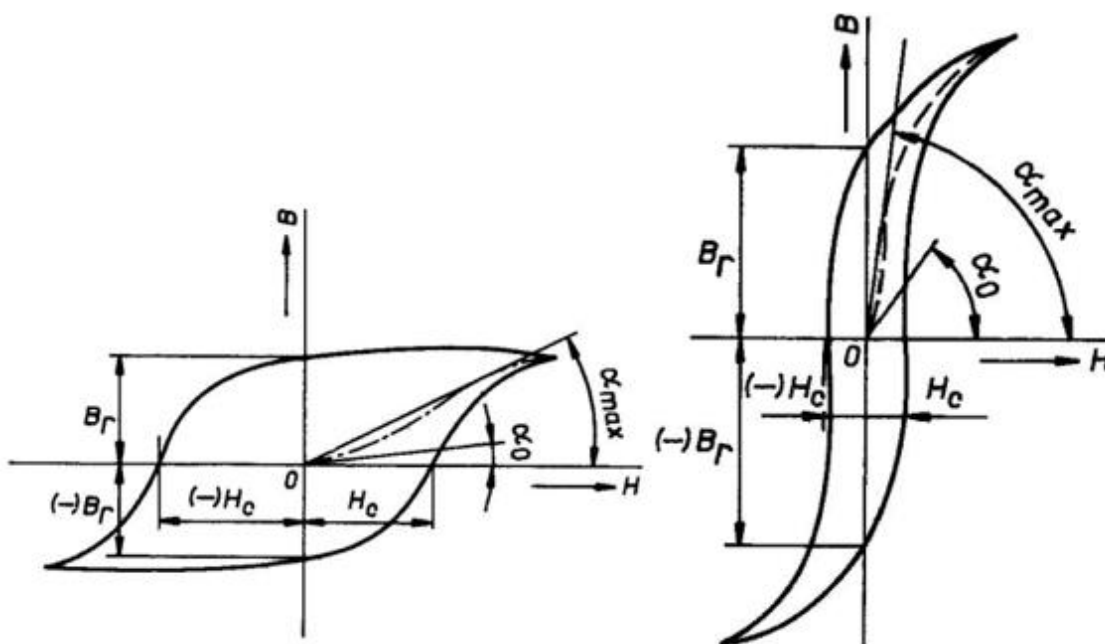
Obrázek 1.12: křivka prvotní magnetizace feromagnetika [1]

V oblasti 1 dochází k mírnému posunu Blochových stěn. Po odebrání vnějšího magnetického pole se Blochovy stěny vrátí do původního stavu. V oblasti 2 dojde k nevratnému posunu Blochových stěn, vytvoří se jediná doména a roste magnetická indukce. V oblasti 3 dochází k natočení vektoru magnetizace. V oblasti 4 došlo k magnetickému nasycení materiálu [12].

1.4.2 Hysterezní smyčka

Při snižování intenzity magnetického pole se začne snižovat magnetická indukce. Magnetická indukce neklesá po křivce prvotní magnetizace. Po dosažení nulové hodnoty intenzity magnetického pole není feromagnetický materiál odmagnetován a zůstává remanentní magnetická indukce B_r . Doména je natočena jedním směrem. Při působení opačně orientovaného magnetického pole se látka nedemagnetizuje, ale doména se začne pomalu stáčet do směru tohoto opačného magnetického pole. Při překonání koercitivní intenzity magnetického pole H_c dojde k úplnému natočení domény do směru opačně orientovaného magnetického pole, tzn. k přepólování feromagnetika. Pokud opakujeme proces, vznikne hysterezní smyčka [12].

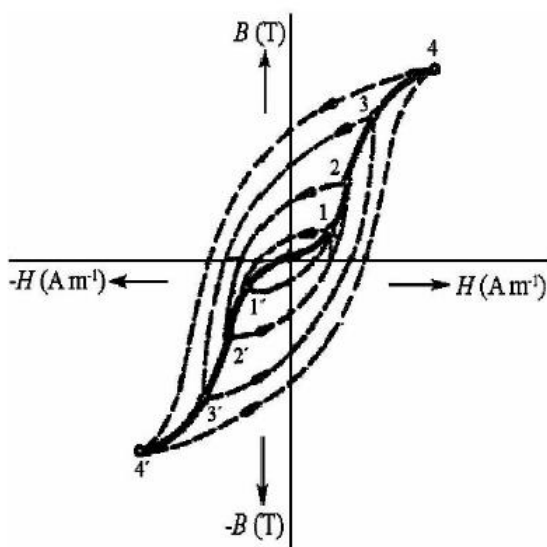
V závislosti na velikosti koercitivní intenzity magnetického pole H_c je možno rozdělit magnetické materiály na magneticky měkké a magneticky tvrdé materiály, kdy hranice je $H_c = 10^3$ A/m. Magneticky tvrdé materiály mají širokou hysterezní křivku, tudíž uzavírají velkou plochu a magneticky měkké materiály mají úzkou hysterezní křivku, tudíž uzavírají malou plochu (viz obrázek 1.13). Velikost plochy hysterezní křivky určuje hysterezní ztráty magnetického materiálu. Velikost koercitivní intenzity magnetického pole H_c nám říká, jak moc je velká potřebná intenzita magnetického pole ke zrušení remanentní magnetické indukce B_r [12].



Obrázek 1.13: široká a úzká hysterezní smyčka [12]

1.4.3 Komutační křivka

Při měření několika hysterezních smyček s různými intenzitami magnetického pole budou jejich vrcholy ležet na komutační křivce, tzn., že komutační křivka je spojnice těchto vrcholů. Tato spojnice je souměrná podle počátku a téměř se neliší od křivky prvotní magnetizace. Komutační křivka je zobrazena na obrázku 1.14[13].



Obrázek 1.14: komutační křivka [12]

1.5 Dělení magnetických materiálů dle využití

1.5.1 Magneticky měkké materiály

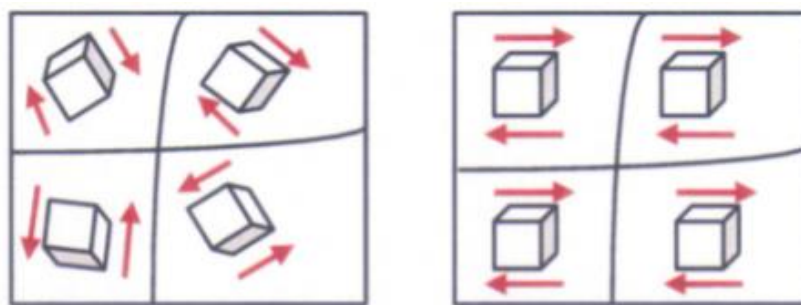
Tvar hysterezní smyčky těchto materiálů je úzký, tzn., že mají nízké hysterezní ztráty. Jejich koercitivní intenzita magnetického pole je malá a v důsledku se je snadné magneticky měkké zmagnetovat a odmagnetovat. Křivka prvotní magnetizace má strmý průběh. Po zmagnetování zůstává vysoká remanentní magnetická indukce B_r . Relativní permeabilita těchto materiálů dosahuje vysokých hodnot [1][12].

Mezi tyto materiály patří např. čisté železo s velmi nízkým obsahem uhlíku, maximálně do 0,1 %. Větší obsah uhlíku nebo jiných příměsí by zhoršoval magnetické vlastnosti materiálu. Čisté železo má vysokou vodivost, proto se používá pro např. stejnosměrné stroje. Při střídavém magnetování vznikají velké ztráty vířivými proudy [1][12].

Železo lze legovat křemíkem s obsahem křemíku maximálně do 5 % a vznikne křemíková ocel. Mezi pozitivní vlastnosti při přidání křemíku se zvětší rezistivita materiálu, tudíž se zmenší ztráty vířivými proudy, zmenší se koercitivní intenzita magnetického pole (zhruba 2 A/m), zvýší se permeabilita, železo méně oxiduje, protože křemík váže kyslík obsažený v železe. Jednou z negativních vlastností je, že se zvyšuje křehkost materiálu. Křemíkové plechy se válcují za tepla nebo za studena [1][12].

Při válcování za tepla vznikne magneticky izotropní plech (viz obrázek 1.15), tzn., že krystaly plechů jsou uspořádány náhodně a vlastnosti plechu jsou ve všech směrech téměř shodné a nezávisí na směru válcování. Plechy se válcují na tloušťku 0,35; 0,5 nebo 1 mm. V materiálu vznikají vnitřní pnutí zhoršující magnetické vlastnosti materiálu, a to zvýšením koercitivní intenzity magnetického pole a snížením relativní permeability. Měrné ztráty se pohybují kolem 1,3 do 3,6 W/kg. Plechy jsou poté pokryty vrstvou izolace např. lakem, vodním sklem atd. Tyto plechy se využívají pro výrobu transformátorů a elektrických točivých strojů [1][14].

Válcované plechy za studena jsou anizotropní (viz obrázek 1.15), tzn., že krystaly se orientují ve směru válcování a v tomto směru je snadná magnetizace, a proto je nutno navrhovat magnetický obvod tak, aby průběh magnetického toku byl ve směru válcování. Taková struktura se nazývá Gossova struktura. Ve směru válcování mají tyto materiály vysokou relativní permeabilitu a nízkou koercitivní sílu. Měrné ztráty těchto materiálů se pohybují kolem 0,4 do 0,7 W/kg. Plechy jsou válcovány na tloušťku 0,35; 0,13 nebo 0,8 mm. Plechy jsou pokryty tenkou vrstvou izolace. Tyto plechy se používají např. pro výrobu distribučních transformátorů [1][14].



Obrázek 1.15: izotropní struktura a anizotropní struktura [1]

Slitina železa a niklu se nazývají permalloye. Obsah niklu se pohybuje kolem 80 %. Rezistivita je zvýšena legováním křemíku, manganu, molybdenu a chromu. Tato slitina se vyznačuje nízkou koercitivní intenzitou magnetického pole a vysokou relativní permeabilitou dosahující hodnot 10^5 . Permalloye se používají pro jádra transformátorů, uplatňují se ve sdělovací technice, používají se pro stínicí kryty apod [1][12].

1.5.2 Magneticky tvrdé materiály

Tvar hysterezní smyčky těchto materiálů je široký, a to vede k velkým hysterezním ztrátám, jelikož je nutno dodat velké množství energie k přemagnetování magnetických materiálů. Magneticky tvrdé materiály jsou charakterizovány velkou koercitivní silou, a proto se špatně magnetují a po zmagnetování je obtížné je odmagnetovat. Po zmagnetování zůstává vysoká remanentní indukce. Tyto materiály se převážně využívají pro výrobu permanentních magnetů [1][12].

Mezi tyto materiály patří např. slitiny typu Alnico. Jak už název vypovídá, k železu jsou přidány kobalt, hliník a nikl. Slitiny typu Alnico jsou velmi tvrdé a křehké.

Obrobitelné jsou pouze broušením. Slitiny Alnico se využívají např. jako permanentní magnety v měřicích přístrojích a elektrických strojích. Permanentní magnety se vyrábí odléváním a práškovou metalurgií [1].

1.5.3 Ztráty ve feromagnetických materiálech

Po vložení feromagnetického materiálu do střídavého magnetického pole se feromagnetikum neustále přemagnetovává a poté dochází ke ztrátě energie. Ztráty se projevují zahříváním magnetického materiálu. Celkové ztráty jsou dány součtem různých ztrát, které mají svou podstatu. Jde o hysterezní ztráty, ztráty vířivými proudy a ztráty magnetickým zpožděním. Tedy celkové ztráty jsou dány vztahem:

$$P = P_h + P_v + P_z [W]. \quad (1.14)$$

Hysterezní ztráty vznikají vnitřními pochody při změnách doménových oblastí při střídavém magnetování a dojde k zahřívání feromagnetického materiálu. Hysterezní ztráty jsou úměrné ploše statické hysterezní smyčky, frekvenci střídavého magnetického pole a objemu materiálu. Výpočtový vztah pro hysterezní ztráty je:

$$P_h = V \cdot S_s \cdot f [W; J/m^3, Hz], \quad (1.15)$$

kdy V je objem feromagnetika S_s je plocha statické hysterezní smyčky a f je frekvence střídavého magnetického pole [12].

Ztráty vířivými proudy vznikají průchodem indukovaných proudů magnetickým materiálem ve střídavém magnetickém poli. Příčinou vzniku je tedy elektrická vodivost daného feromagnetika. Kvůli vířivým proudům vzniká povrchový jev projevující se vytlačněním magnetického toku na povrch vodiče, k jeho nerovnoměrnému rozložení magnetického toku a tím pádem i magnetické indukce. Výpočet těchto ztrát je tedy

$$P_v = \frac{4}{3} \cdot \frac{V}{\rho} \cdot k^2 \cdot h^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 [W; m^3, \Omega m, -, m, Hz], \quad (1.16)$$

kde ρ je rezistivita materiálu, k je činitel tvaru křivky indukovaného napětí, h je tloušťka feromagnetického materiálu, V je objem feromagnetického materiálu a B_m je magnetická indukce. Z tohoto vztahu lze vidět, že tyto ztráty jsou silně závislé na frekvenci střídavého magnetického pole. Tyto ztráty lze snížit tím, že zvýšíme rezistivitu daného materiálu, a to přidáním křemíku do základního materiálu anebo lze vyrobit izolované plechy, kdy se prodlouží dráhy vířivých proudů a zmenší se průřez [12].

Ztráty magnetickým zpožděním se nejvíce projevují u magneticky měkkých materiálů při nízkých intenzitách magnetického pole. Vznikají tím, že elektrony se snaží sledovat změny střídavého magnetického pole [12].

Ztráty feromagnetik jsou obvykle vyjadřovány měrnými ztrátami vyjadřující ztráty na 1 kilogram hmotnosti feromagnetického materiálu. Výpočtový vztah je tedy

$$p = \frac{P}{m} [W/kg; W, kg], \quad (1.17)$$

kde p jsou měrné ztráty, P jsou celkové ztráty a m je hmotnost feromagnetického materiálu [1].

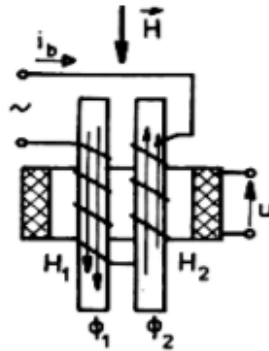
1.6 Metody měření magnetických vlastností

1.6.1 Indukční metody

Tyto zařízení fungují na principu Faradayova zákona elektromagnetické indukce popisující vznik indukovaného napětí na cívce.

Zařízení, které patří do této skupiny je feromagnetická sonda nebo také fluxgate. Nejčastěji se skládá ze dvou feromagnetických jader, na kterých jsou navinuty cívky tak, aby se jejich magnetické toky navzájem vykompenzovaly. Feromagnetická jádra s cívkami jsou umístěna v měřicí cívce [15][16].

Cívky obou jader jsou buzeny periodickým proudem $i_b(t)$. Pokud není sonda umístěna ve vnějším magnetickém poli, magnetické toky cívek jsou stejné, avšak s opačným směrem, a proto je indukované napětí na měřicí cívce nulové. Po vložení feromagnetické sondy do vnějšího magnetického pole s určitou intenzitou magnetického pole H dojde k porušení souměrnosti magnetických toků jader a v důsledku se na měřicí cívce indukuje napětí $u(t)$. Feromagnetické sondy se využívají k měření kolísání magnetického pole Země, používá se v kompasech letadel a lodí [15][16].



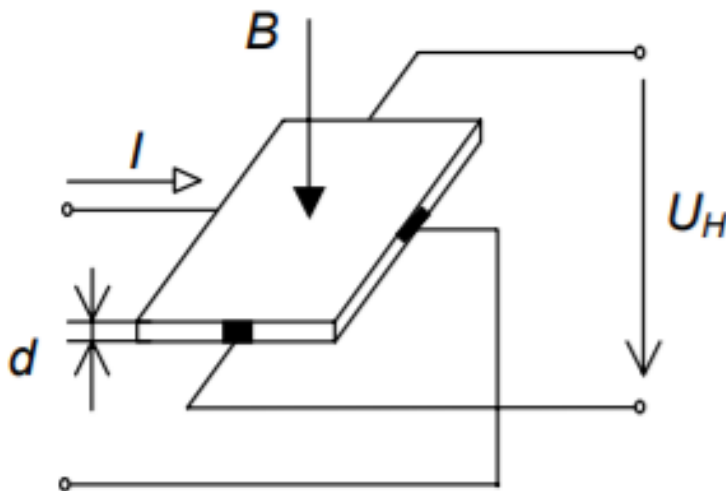
Obrázek 1.16: feromagnetická sonda [16]

1.6.2 Hallova sonda

Hallové sondy se využívají pro měření stejnosměrných magnetických polí. Pracují na principu Hallova jevu, kdy je většinou polovodičová destička, kterou prochází elektrický proud, vložena do magnetického pole, kde vektory magnetické indukce jsou kolmé na směr elektrického proudu, působí na nosiče elektrického proudu tzv. Lorentzova síla a dráha těchto nosičů je vychýlena. Na jedné straně destičky je nahromaděn kladný náboj a na druhé straně je nahromaděn záporný náboj a vzniká tzv. Hallovo napětí. Velikost Hallova napětí lze vypočítat pomocí vztahu

$$u_H = \frac{R_H \cdot I}{d} \cdot B \text{ [V; } m^3/C, A, m, T], \quad (1.18)$$

kde R_H je Hallova konstanta, I je elektrický proud procházející destičkou, d je tloušťka destičky a B je velikost magnetické indukce [2][13][16][17].



Obrázek 1.17: Hallova sonda [16]

1.6.3 Metody měření hysterezních smyček

Tyto přístroje také využívají Faradayova zákona elektromagnetické indukce. V tomto případě známe plochu závitu S , a při měření magnetického toku Φ , který prochází cívkou, lze snadno změřit magnetická indukce dle

$$U_i = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot S \cdot \frac{dB}{dt} \text{ [V; } -, Wb, m^2, T, s], \quad (1.19)$$

kde N je počet závitů cívky [15].

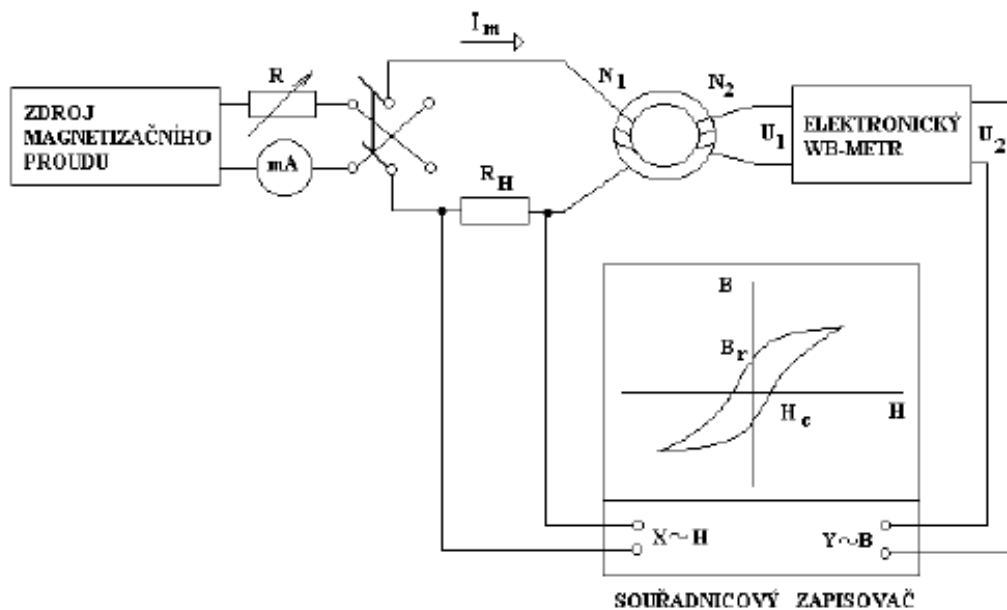
Do těchto metod patří např. měření se stacionární cívkou, tzn., že cívka je nepohyblivá a je nutná integrace napětí podle času:

$$B = -\frac{1}{N \cdot S} \cdot \int U_i dt \text{ [T; } -, m^2, V, s]. \quad (1.20)$$

Tato metoda se převážně používá pro vykreslení hysterezní smyčky magneticky měkkých materiálů. Zařízení pracující na principu stacionární cívky mají vysokou citlivost měření [15].

Jedním způsobem měření je měření na uzavřených vzorcích. Pro zobrazení hysterezní smyčky je nutno konstantně měřit hodnoty magnetické indukce B a intenzity magnetického pole H . Pokud je vzorek ve tvaru toroidu navinut magnetizačním vinutím N_1 a měřicím vinutím N_2 , bude se při pomalých změnách magnetizačního proudu I_m indukovat v měřicím vinutí N_2 napětí [16].

Pro určení magnetické indukce B je nutno toto indukované napětí integrovat pomocí elektronického Wb-metru, což je v principu integrační zesilovač. Hysterezní smyčka je zobrazena na souřadnicovém zapisovači. Na vstup X zapisovače je přivedeno napětí z referenčního rezistoru R_H , které je úměrné magnetizačnímu proudu, resp. intenzitě magnetického pole H . Na vstup Y zapisovače je přivedeno integrované napětí z elektronického Wb-metru, které je úměrné magnetické indukci B . Pokud je vzorek přemagnetováván, lze obdržet grafický záznam hysterezní smyčky [16].



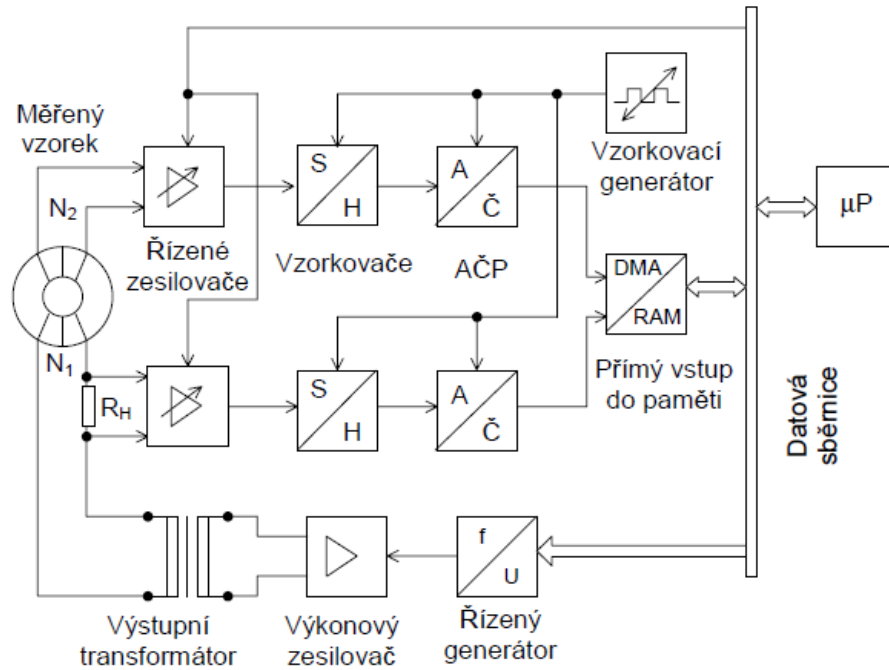
Obrázek 1.18: měření na uzavřeném vzorku [16]

V dnešní době jsou využívány hysterezigrafy. Měření hysterezních smyček je touto metodou digitalizováno a je řízeno počítačem [16].

Na měřeném vzorku ve tvaru toroidu jsou navinuty dvě vinutí, a to N_1 a N_2 , kdy N_1 magnetuje měřený toroid a N_2 slouží jako měřicí vinutí. Vinutí N_1 je napájeno z transformátoru, který je propojen s výkonovým zesilovačem, kdy jeho amplituda a frekvence jsou řízeny počítačem. Napětí na rezistoru R_H je úměrné intenzitě magnetického pole a napětí indukující se na vinutí N_2 se zesiluje dvojnásobně řízenými zesilovači, kdy jejich zesílení je řízeno počítačem. Zesílená napětí jsou vzorkována přes

S/H obvody a pomocí AD převodníků jsou přes obvody DMA/RAM ukládány do paměti počítače [16].

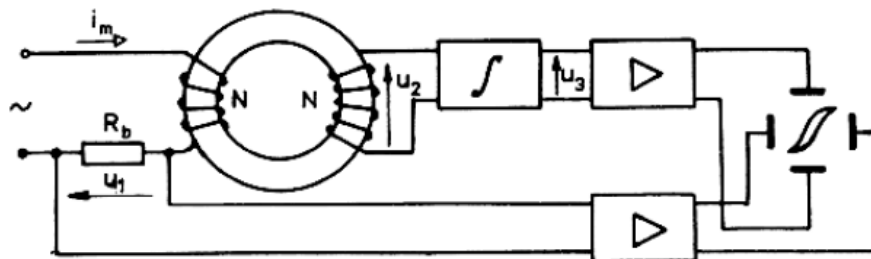
Z těchto dat počítač počítá průběh magnetické indukce integrací z měřicí cívky N_2 . Dále počítač počítá hysterezní ztráty, koercitivní intenzitu magnetického pole, remanentní magnetickou indukci a poté je zobrazena hysterezní smyčka [16].



Obrázek 1.19: blokové zapojení hysterezigrafu [16]

Dále je možné zobrazit hysterezní smyčku na osciloskopu. Tato metoda je často používána pro porovnání různých materiálů k určení jejich vlastností atd [16].

Toroidní vzorek je navinut dvěma vinutími. Vzorek je magnetován proudem i_m . Napětí u_1 na rezistoru R_b je úměrné intenzitě magnetického pole H a toto napětí je přes zesilovač přivedeno na horizontální vstup osciloskopu. Na druhém vinutí je naindukováno napětí u_2 , které je integrováno např. RC členem. Podmínka dobré integrace je, že odpor rezistoru R musí být mnohem větší než reaktance kondenzátoru C ($R \gg 1/\omega C$). V důsledku je napětí u_3 na výstupu RC článku malé, a proto musí být zesíleno. Po zesílení je toto napětí přivedeno na vertikální vstup osciloskopu a na obrazovce je zobrazena hysterezní smyčka [16].



Obrázek 1.20: zapojení měření hysterezní smyčky pomocí osciloskopu [16]

2. PRAKTICKÁ ČÁST

Měření hysterezní smyčky je prováděno na dvou vzorcích, a to na litém jádru a na jádru z lisovaných transformátorových plechů.

2.1 Metoda měření

Stanoviště (viz obrázek 2.2) se skládá z výkonového generátoru funkcí, měřicí stanice CASSY, která je připojena k PC, a z dvou feromagnetických jader, na které se nasazuje primární a sekundární cívka, kdy počet závitů obou cívek je 500. Rozsah napětí, které je možno nastavit na generátoru, je od 0 do 6 V. Frekvenční rozsah se pohybuje od 0,1 Hz do 20 kHz.

Na výstupu výkonového generátoru je generován trojúhelníkový signál o frekvenci 0,1 Hz a napětí 2 V. Na výkonovém generátoru je možno nastavit i jiné tvary signálu, a to sinus a obdélník. Měřicí stanice CASSY zaznamenává proud I_{A1} tekoucí primární cívkou a napětí naprázdno U_{B1} indukující se na sekundární cívce. Program v PC poté z naměřených hodnot napětí vypočítává magnetický tok Φ dle

$$\Phi = \int U_{B1} dt \quad (2.1)$$

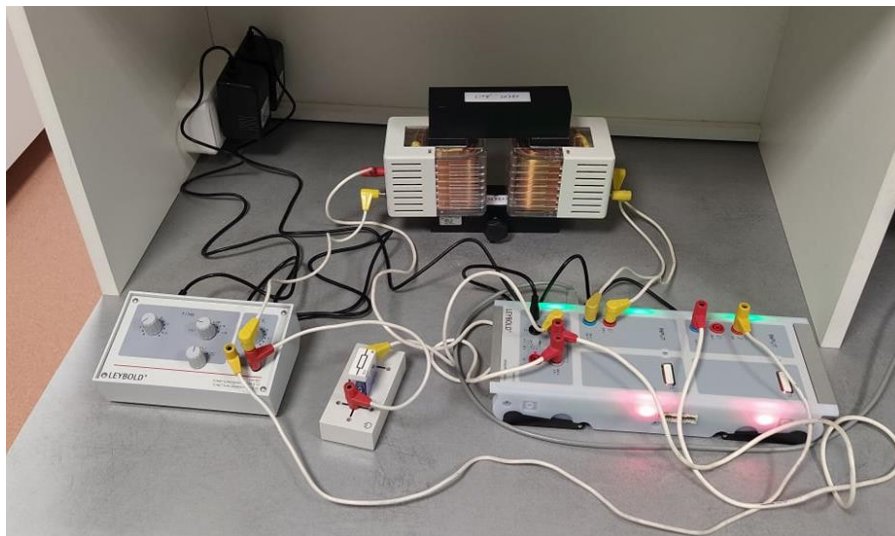
a z magnetického toku Φ lze vypočítat magnetická indukce B dle

$$B = \frac{\Phi}{N_2 \cdot S} \quad (2.2)$$

kdy N_2 je počet závitů na sekundární cívce a S je průřez jádra ($S = 16 \text{ cm}^2$). Intenzita magnetického pole je vypočtena dle vztahu

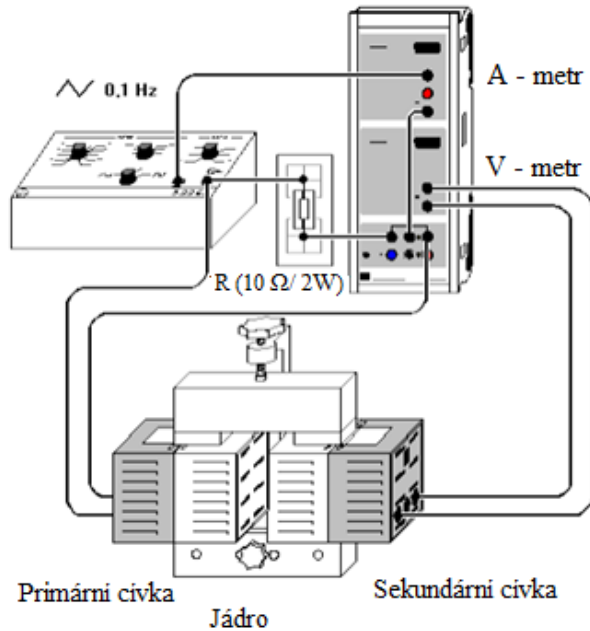
$$H = \frac{N_1 \cdot I}{l_s}, \quad (2.3)$$

kde N_1 je počet závitů primární cívky, I je proud a l_s je střední délka siločáry [18].



Obrázek 2.1: měřicí stanoviště

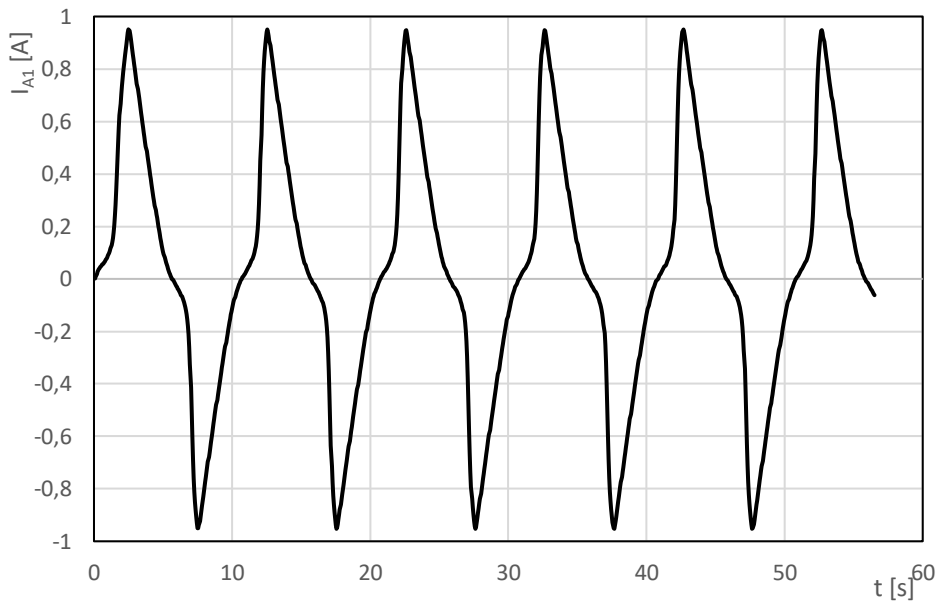
Jak již bylo řečeno, měřicí stanice CASSY zaznamenává proud tekoucí primární cívkou. V době, kdy není vykreslována hysterezní smyčka, proud z generátoru teče přes rezistor do země. Při průchodu proudu nulou přepne integrované relé obvod a proud z generátoru teče do primární cívky a sytí měřené jádro. Průchodem nulou je zajištěno, že hysterezní smyčka je vykreslována z počátku souřadného systému.



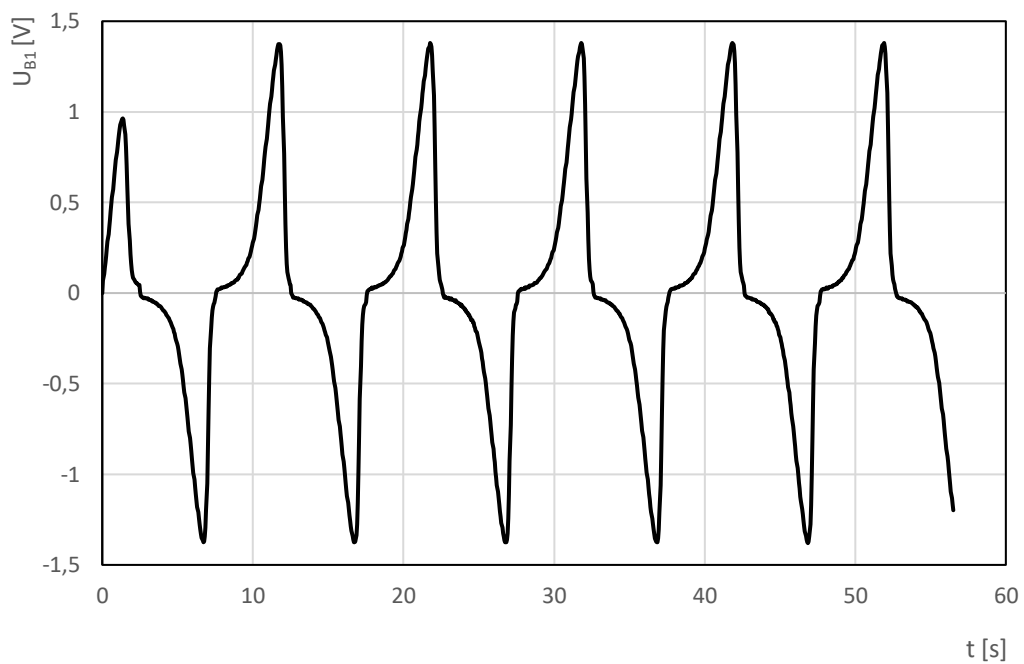
Obrázek 2.2: schéma měřicího stanoviště [18]

2.1.1 Měření hysterezní smyčky jádra z lisovaných transformátorových plechů

Pro toto měření byly změřeny časové průběhy proudu I_{A1} (viz obrázek 2.3) tekoucí primární cívkou a napětí naprázdno U_{B1} zobrazený na obrázku 2.4.

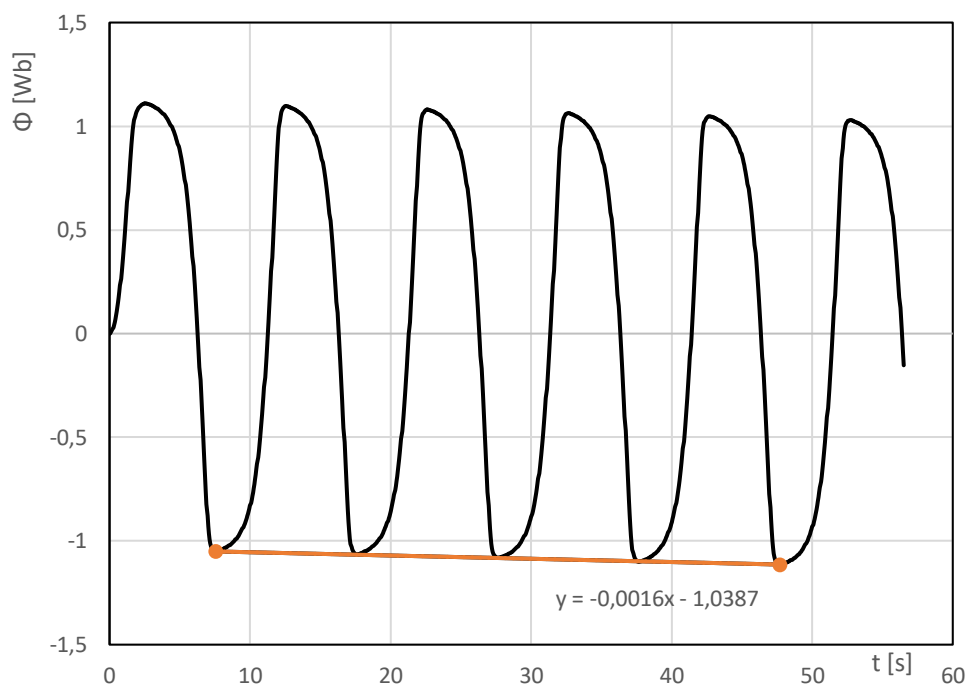


Obrázek 2.3: časový průběh proudu primární cívkou

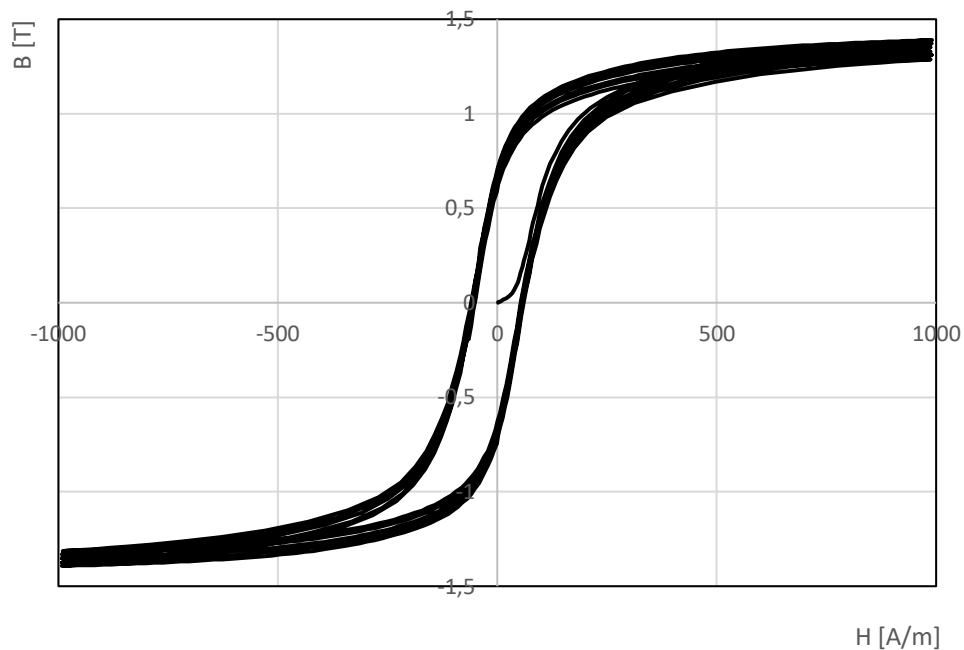


Obrázek 2.4: časový průběh napětí naprázdno na sekundární cívce

Pomocí integrace dle vzorce 2.1 byl z naměřených hodnot U_{B1} vykreslen časový průběh magnetického toku Φ zobrazený na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: výsledek integrace napětí U_{B1}



Obrázek 2.6: hysterezní smyčka lisovaných transformátorových plechů před korekcí offsetu

Z časového průběhu napětí naprázdno zobrazeného na obrázku 2.4 lze vidět, že průběh se posouvá, jelikož výkonový generátor vykazuje stejnosměrný posuv nebo také offset. Toto napětí je poté integrováno podle vzorce 2.2 a také je integrován i tento offset, což je konstanta. Integrace konstanty je přímka a podle směrnice této přímky se posouvají výsledné hysterezní smyčky na obrázku 2.6.

2.1.2 Zjištění velikosti offsetu a jeho následné řešení

Při zjišťování směrnice přímky byly vybrány 2 body v obrázku 2.4, a to 2 minima: $\Phi_{MIN1} = -1,050585$ Wb v čase $t_1 = 7,56$ s; $\Phi_{MIN2} = -1,1136725$ Wb v čase $t_2 = 47,71$ s. Směrnice přímky k :

$$y = kx + q \quad (2.4)$$

$$\Phi_{MIN1} = k \cdot t_1 + q$$

$$\Phi_{MIN2} = k \cdot t_2 + q$$

$$-1,050585 = 7,56k + q$$

$$\underline{-1,1136725 = 47,71k + q \quad / \cdot (-1)}$$

$$-1,050585 = 7,56k + q$$

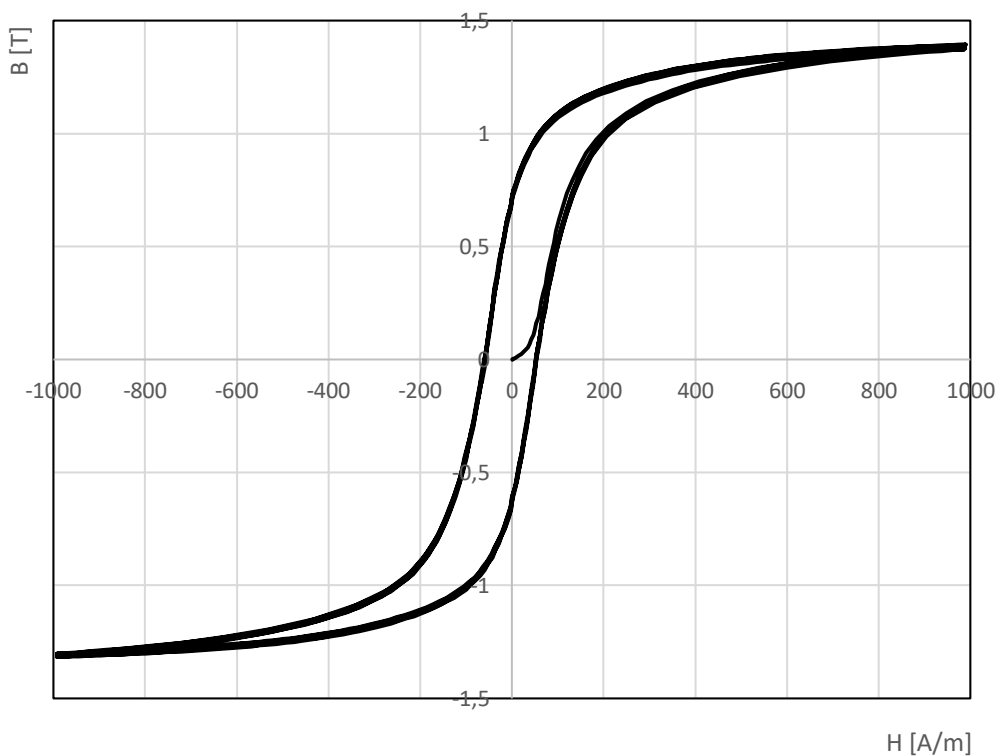
$$\underline{1,1136725 = -47,71k - q}$$

$$0,0630875 = -40,15k \rightarrow k = -\frac{0,0630875}{40,15} = -0,0016$$

$$q = -1,050585 - 7,56k = -1,050585 - 7,56 \cdot (-0,0016) = -1,0387$$

$$y = -0,0016x - 1,0387$$

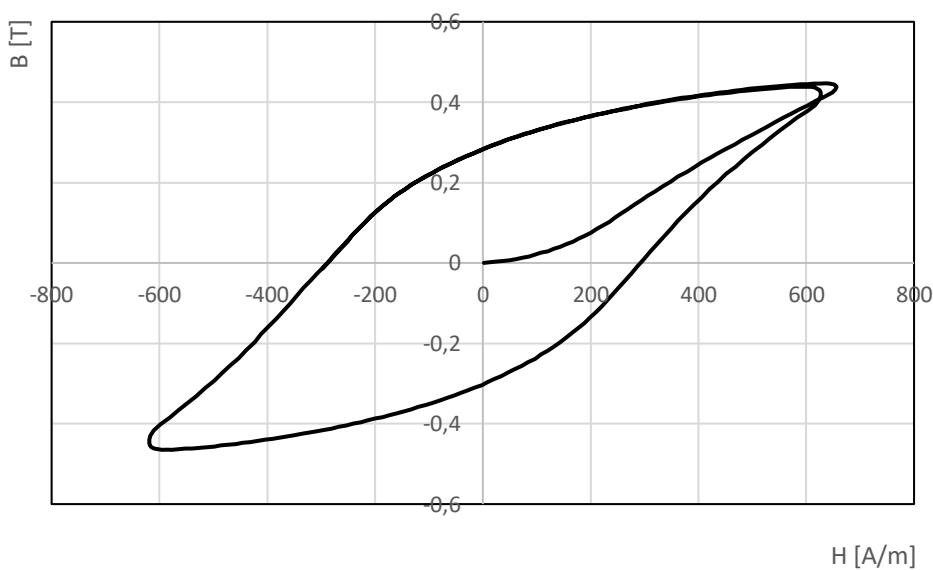
Při přičtení přímky s opačnou směrnici, tj. $k = 0,0016$, bylo možné provést korekci offsetu a výsledné hysterezní smyčky se překrývají (viz obrázek 2.7).



Obrázek 2.7: hysterezní smyčka transformátorových plechů po korekci offsetu

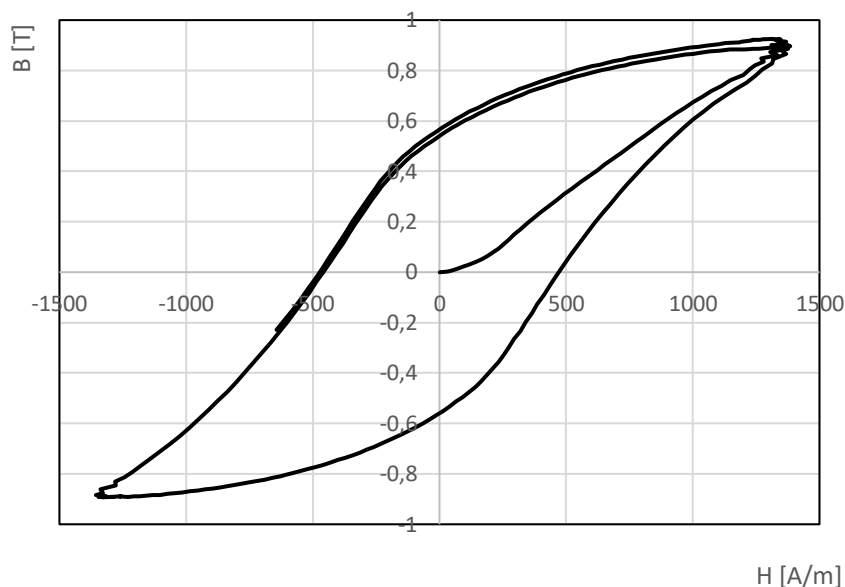
2.1.3 Měření hysterezní smyčky litého jádra

Při měření hysterezní smyčky litého jádra byl aplikován stejný postup jako při měření hysterezní smyčky lisovaných transformátorových plechů. Na výstupu generátoru byl generován trojúhelníkový signál s frekvencí 0,1 Hz a napětím 2 V.



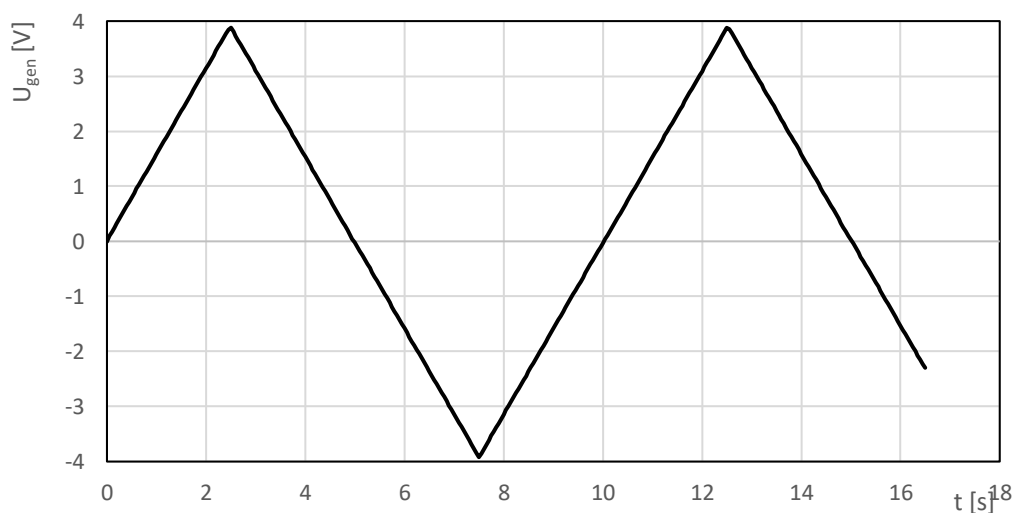
Obrázek 2.8: hysterezní smyčka litého jádra při $f = 0,1$ Hz a $U = 2$ V

Z obrázku 2.8 je patrné, že proud tekoucí primární cívkou při nastaveném napětí 2 V není dostačující pro nasycení litého jádra, proto bylo nutné výstupní napětí generátoru zvýšit. Při zvýšení výstupního napětí generátoru nastal problém, kdy v obrázku 2.9 je vidět, že generátor trojúhelníkového signálu není dostatečně výkonný pro nasycení litého jádra, a proto se na hysterezní smyčce v maximech generují zákmity.



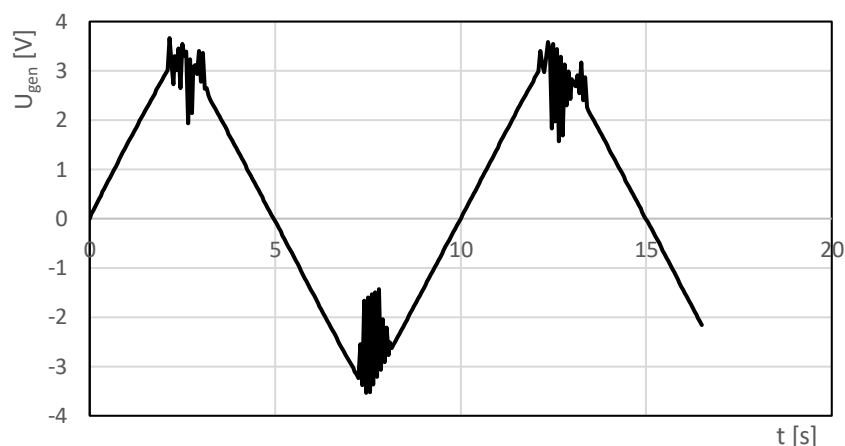
Obrázek 2.9: zobrazení zákmitů při zvýšení výstupního napětí generátoru

Byl ověřen časový průběh napětí z výkonového generátoru bez připojené zátěže. Z obrázku lze usoudit, že průběh má ideální trojúhelníkový tvar.



Obrázek 2.10: výstupní napětí generátoru bez připojené zátěže

Až po připojení zátěže se při stejně nastaveném napětí začínají v maximech a minimech napětí objevovat zákmity projevující se na hysterezní smyčce v obrázku 2.9.

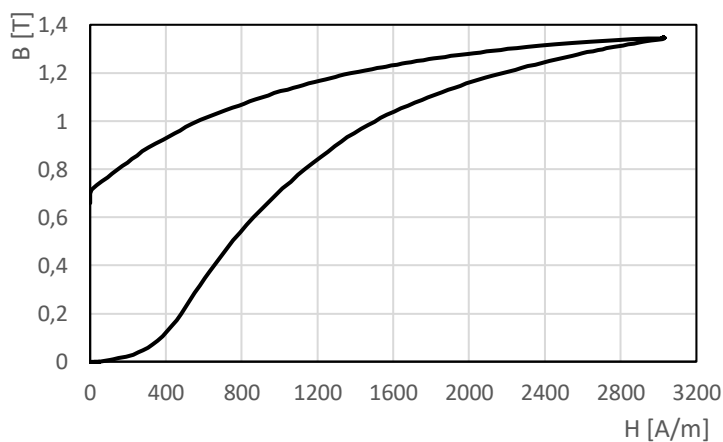


Obrázek 2.11: zobrazení zákmitů při připojené zátěži

Pro nasycení litého jádra je tedy nutné mít dostatečně výkonný zdroj. Bylo nutné zjistit, jaký proud je nutný pro nasycení litého jádra. Pro toto ověření byl místo generátoru připojen laboratorní zdroj Diametral P230R51D.

Maximální proudový rozsah měřicí stanice CASSY jsou 3 A, proto bylo nutné na zdroji Diametral nastavit proudové omezení 3 A. Na laboratorním zdroji byl ručně zvyšován výstupní proud do hodnoty 3 A sytící jádro a poté byl ručně i snížen. Na obrázku 2.12 je zobrazena křivka prvotní magnetizace litého jádra. Dle této křivky lze usoudit, že proud dodávaný ze zdroje Diametral (3 A) je dostačující pro nasycení litého jádra, a proto musí být zesílen dosavadní proud generátoru. Proto byl v rámci této práce navržen zesilovač, který bude napěťově zesilovat výstupní signál z generátoru.

Intenzita magnetického pole potřebná k nasycení litého jádra je závislá na tomto proudu, ale i na počtu závitů primární cívky dle rovnice 2.3. Dalším z možných řešení problému je spojit primární a sekundární cívku do série, čímž by se dosáhlo dvojnásobné intenzity magnetického pole při stejném proudu, avšak bylo by nutné navinout novou měřicí cívku. Bylo rozhodnuto, že touto cestou nebude práce cílena.



Obrázek 2.12: křivka prvotní magnetizace s připojeným laboratorním zdrojem

2.2 Návrh zesilovače

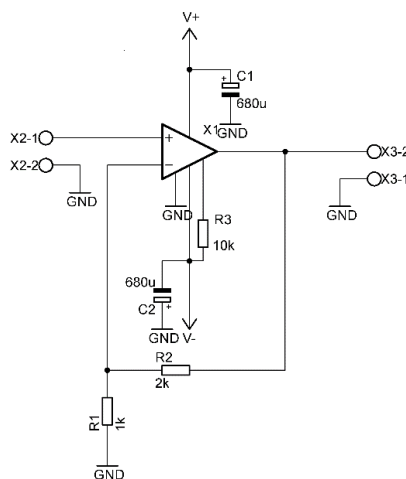
Navržený zesilovač se skládá z operačního zesilovače LM3886T, který je zapojen jako neinvertující zesilovač (viz obrázek 2.13).

Napěťový rozsah generátoru je od 0 do 6 V. Zátěž je reprezentována primární cívkou o odporu vinutí $2,5 \Omega$, tedy maximální proud dodávaný generátorem by byl 2,4 A. Tento proud je nedostačující pro nasycení litého jádra. Řešením je tedy nastavení zesílení OZ na $A = 3 [-]$ dle vzorce 2.5 a nastavení napětí generátoru na 2,5 V. Díky tomu bude napětí na primární cívce 7,5 V a proud tekoucí cívkou bude požadovaných 3 A.

Operační zesilovač LM3886T primárně slouží jako nízkofrekvenční audio zesilovač s funkcí MUTE. Touto funkcí je vypínán koncový stupeň zesilovače při proudu tekoucí vývodem MUTE menší než 0,5 mA. Tento proud se nastavuje pomocí rezistoru R_3 v obrázku 2.13. Vývod MUTE je propojen se záporným pólem napájení. Pokud se tak nestane, zesilovač vypíná koncový stupeň a na výstupu není generován žádný signál [20].

Maximální napětí, kterým může být tento zesilovač napájen, je ± 42 V při přivedení vstupního signálu. Tento zesilovač není typu rail-rail, tzn., že na výstupu není možné generovat plný rozsah napájecího napětí $\pm U_N$. Saturační napětí tohoto zesilovače jsou $U_{sat}^+ = U_N - 1,6$ V a $U_{sat}^- = -U_N + 2,5$ V [20].

Integrované relé měřicí stanice CASSY není vhodné pro tuto aplikaci, jelikož je dimenzované pouze na proud 2 A. Je tedy použito vlastní relé Finder 40.61.7.024.0000, které je dimenzované na vyšší proudy, a to na 16 A a je společně na jedné DPS se zesilovačem.



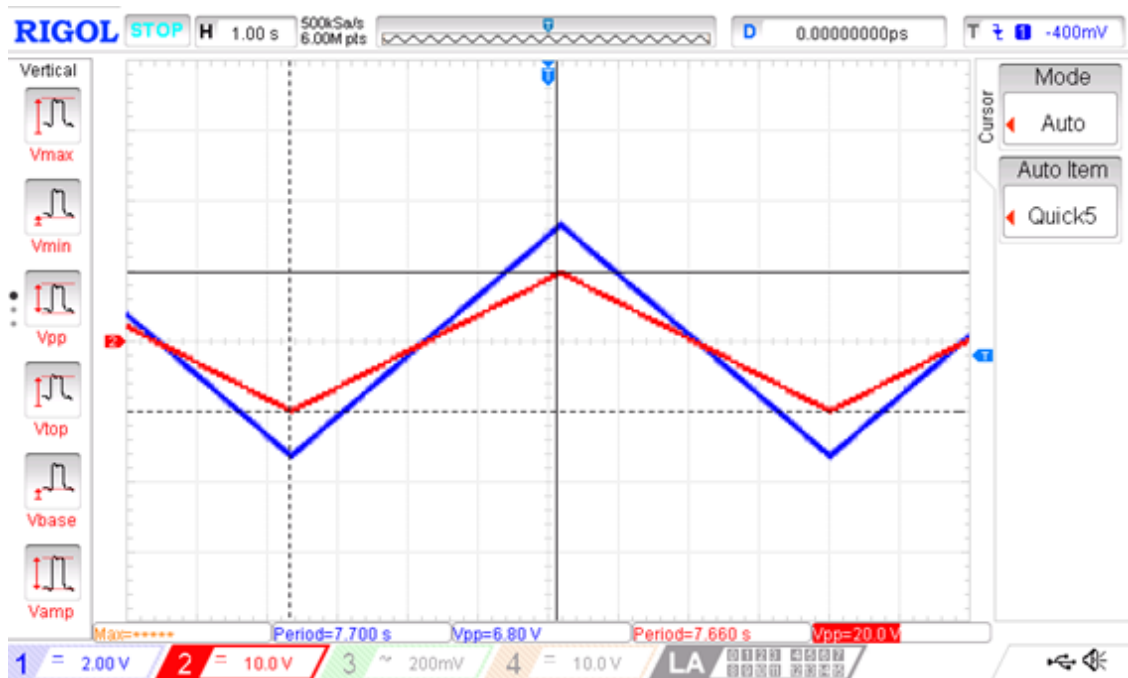
Obrázek 2.13: schéma zapojení neinvertujícího zesilovače s OZ LM3886T

Výpočet zesílení:

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{2000}{1000} = 3 [-] \quad (2.5)$$

2.2.1 Testování zesilovače na univerzální DPS

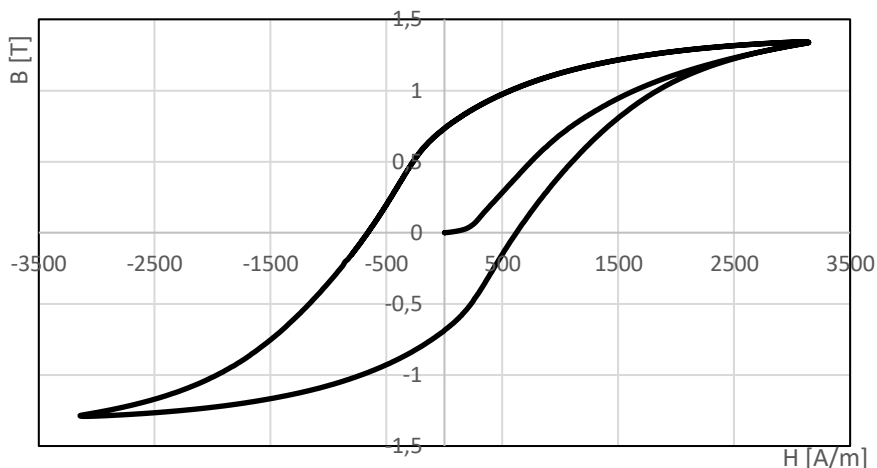
První test byl proveden na univerzální DPS, kde byl nejdřív zkoumán tvar zesíleného výstupního signálu. Jako zdroj signálu byl použit výkonový generátor a jako testovací zátěž byly použity paralelně zapojené 15Ω výkonové rezistory. Průběhy byly zobrazeny na osciloskopu. Z obrázku 2.14 lze vidět ověření, že zesilovač zesiluje vstupní signál trojnásobně dle naměřených hodnot napětí špička-špička. Modře zbarvený signál je vstupní a červený je výstupní signál. Tvarově je signál v pořádku.



Obrázek 2.14: zesílený vstupní signál

Dále byl proveden test, jak se bude zesilovač chovat při měření hysterezní smyčky. Pro napájení zesilovače byl použit laboratorní zdroj Diametral P230R51D s nastavením na napětí ± 20 V. Teoreticky by bylo dostačující přivést napětí ± 10 V se započtením poklesu napětí na výstupu zesilovače. Tato úroveň napětí je krajní minimální hodnota napájecího napětí dle katalogového listu k operačnímu zesilovači LM3886T, proto při tomto napětí zesilovač nezesiloval [20].

Jako zdroj signálu byl použit výkonový generátor s výstupním napětím 2,5 V a frekvencí 0,1 Hz. Po testovacím měření hysterezní smyčky s tímto zesilovačem je zřejmé, že zesilovač vyhovuje, jelikož dojde k plnému nasycení jádra a tvarově je hysterezní smyčka v pořádku, jak lze vidět na obrázku 2.14. Zesilovač tedy může být použit pro realizaci signálového zesilovače.

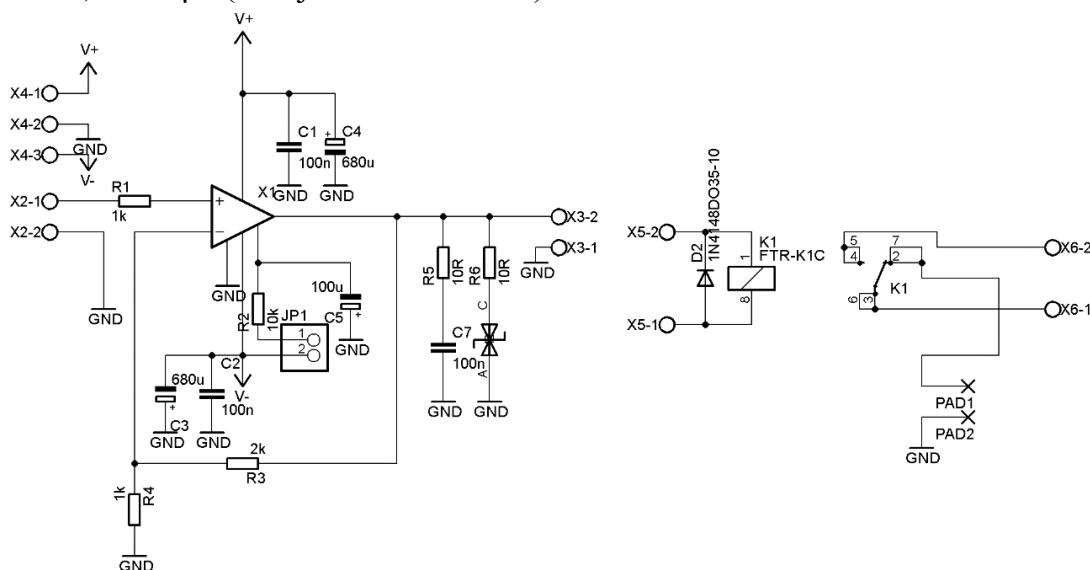


Obrázek 2.15: hysterezní smyčka po zesílení vstupního signálu

Do finální verze zesilovače byly na výstup zesilovače přidány ochrany operačního zesilovače ve formě RC členu (rezistor R_5 a kondenzátor C_7) a 47V obousměrného transilu připojeného proti zemi. Transil slouží jako přepět'ová ochrana (viz obrázek 2.16). Při spínání indukivní zátěže dochází k rychlým změnám magnetického pole indukující napěťové špičky, které mohou být destruktivní pro použitý operační zesilovač. Při spínání indukivní zátěže jsou díky transilu tyto napěťové špičky ořezány na napětí ± 47 V. Rychlé spínání relé také generuje vyšší harmonické, které jsou díky RC členu odfiltrovány. Bez RC členu by se vyšší harmonické dostaly přes zpětnou vazbu do invertujícího vstupu zesilovače a mohlo by dojít k rozkmitání obvodu.

Rezistor R_2 v obrázku 2.16 plní stejnou funkci jako rezistor R_3 v obrázku 2.13. Jumper $JP1$ slouží pro možnost odpojení vývodu MUTE od záporného pólu napájení.

K napájecím vývodům jsou připojeny dva kondenzátory 100 nF (filtruje vyšší frekvence) a 680 μ F (filtruje nízké frekvence).

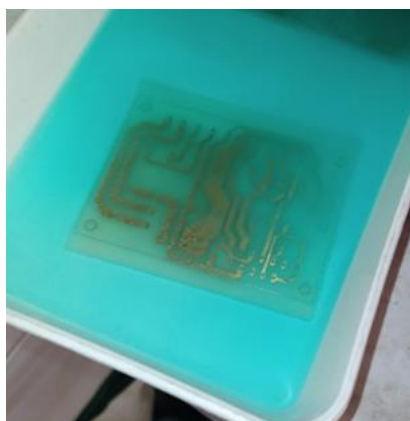


Obrázek 2.16: schéma zesilovače

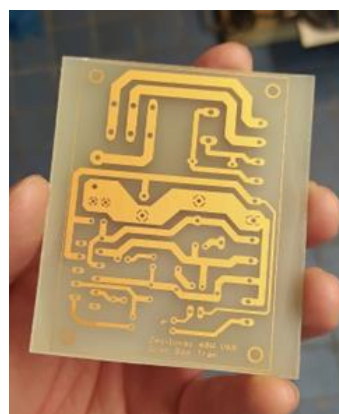
2.2.2 Návrh a výroba DPS zesilovače

Jako základ DPS je cuprexit oplátován mědí na jedné straně s naneseným pozitivním fotorezistem. Předloha byla vytisknuta na laserové tiskárně. Byly vytištěny 2 kopie. Tyto kopie byly nalepeny na sebe, aby nedošlo k průniku UV světla na zakrytou měď.

Expozice pod UV světlem probíhala 3 minuty. Poté byl vyvolán motiv. Vývojkou byla směs hydroxidu sodného s vodou. Leptání nezakryté mědi (viz obrázek 2.17) probíhalo ve směsi kyseliny chlorovodíkové s vodou a peroxidu vodíku. Pro zamezení oxidace mědi byla DPS (viz obrázek 2.18) natřena pájitelným ochranným lakem, což je směs kalafuny s toluenem. Dále byly vyvrtány potřebné otvory. DPS byla osazena součástkami následně byla zapájena pájkou Sn63Pb37.



Obrázek 2.17: leptání DPS



Obrázek 2.18: výsledná DPS

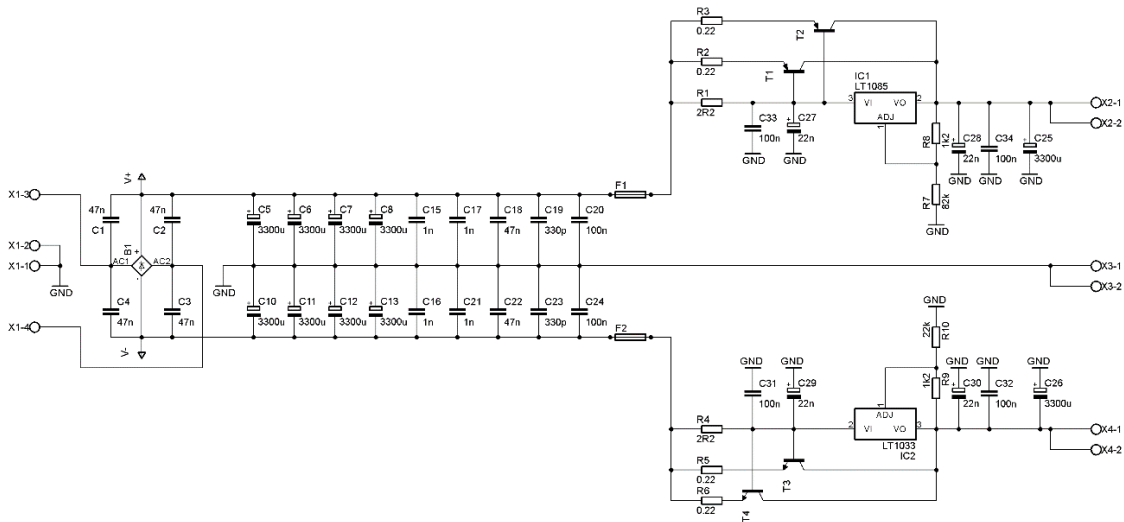
2.3 Napájecí zdroj pro zesilovač

Pro napájení zesilovače byl navržen symetrický zdroj napájení dle obrázku 2.19. Při zátěži $2,5 \Omega$ (odpor primární cívky) by bylo dostačující napájet operační zesilovač LM3886T napětím $\pm 10 \text{ V}$, ale jak již bylo zmíněno, zesilovač s touto úrovní napětí nereagoval. Byla zvolena hodnota napětí $\pm 25 \text{ V}$ kvůli jistotě správné funkce a také kvůli možné rezervě.

Na primárním vinutí toroidního transformátoru je síťové napětí o efektivní hodnotě 230 V . Na sekundárním vinutí je 24 V efektivních, tzn. že amplituda napětí, která je usměrněna usměrňovačem, je 34 V . Napětí je poté stabilizováno pomocí dvou integrovaných obvodů. Pro kladnou větev je použit integrovaný obvod LT1085 a pro zápornou větev integrovaný obvod LT1033. Rezistory R_1 a R_4 slouží pro řízení velikosti proudu tekoucího do stabilizátorů napětí. Při určité velikosti proudu tekoucího do vstupu IO je vytvořen úbytek napětí na přechodech báze-emitor tranzistorů T_1 až T_4 potřebný pro jejich otevření. Část proudu ze vstupu IO tedy bude téct přes tyto tranzistory. Při poklesu proudu se tranzistory opět zavřou. Stabilizátory i tranzistory jsou chlazeny hliníkovým chladičem.

Všechny kondenzátory slouží jako vyhlazovací kondenzátory (viz obrázek 2.19). Tyto kondenzátory vyhlazují možná zvlnění, které mohou vznikat při usměrňování napětí nebo také při zákmitech na stabilizátorech.

Průběh proudu dodávaný ze zdroje je kopírován podle průběhu vstupního signálu. To znamená, že v kladné půlperiodě dodává proud zesilovači kladná větev a v záporné půlperiodě dodává proud zesilovači záporná větev. Záporná i kladná větev je jištěna pomalou 5A pojistkou proti přetížení.



Obrázek 2.19: schéma symetrického zdroje

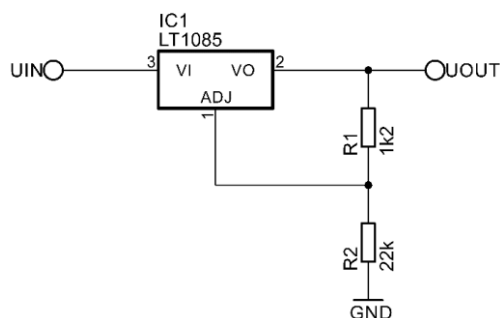
2.3.1 Nastavení výstupního napětí

Dle schématu uvedeného v katalogovém listu (viz obrázek 2.20) ke stabilizátoru LT1085 bylo možné nastavit požadované výstupní napětí. V tomto případě se jedná o napětí přibližně +25 V. Na odporu R_1 je vytvořen úbytek napětí U_{REF} , který je roven 1,25 V. Vývodem ADJ teče proud $I_{ADJ} = 50 \mu\text{A}$, který vytváří téměř zanedbatelnou chybu při nastavení výstupního napětí. Ve výpočtu byl tento proud zahrnut. Byl zvolen odpor $R_2 = 22 \text{ k}\Omega$ a $R_1 = 1,2 \text{ k}\Omega$. Dle výpočtového vztahu 2.6 bylo možné vypočítat požadované výstupní napětí. Pro zápornou větev byl použit analogický postup, jelikož integrovaný obvod LT1033 je komplementární k obvodu LT1085 [20].

Postup výpočtu:

$$U_{OUT} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2 \quad (2.6)$$

$$U_{OUT} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{22000}{1200}\right) + 50 \cdot 10^{-6} \cdot 22000 = 25,27 \text{ V}$$



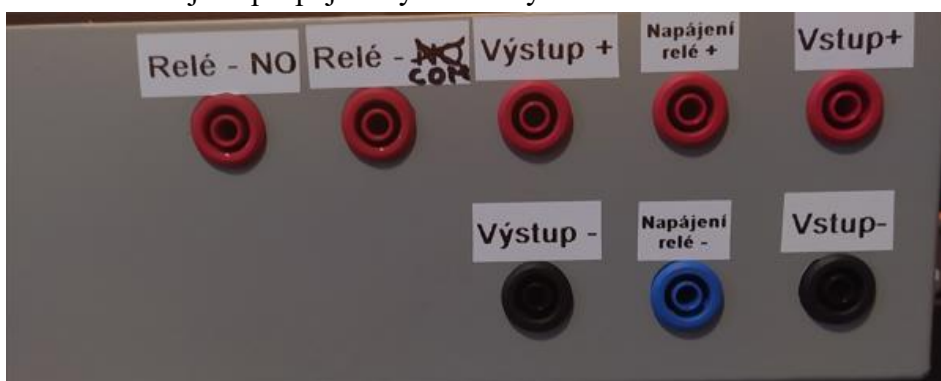
Obrázek 2.20: schéma pro nastavení výstupního napětí

2.4 Finální zařízení

Zdroj i zesilovač jsou umístěny v hliníkové krabici. Do této krabice byly vyvrtány otvory pro uchycení distančních sloupků, do kterých jsou zasazeny jednotlivé DPS a chladiče integrovaných obvodů. Na obrázku 2.21 je zobrazeno, jak jsou umístěny banánkové zdířky sloužící pro připojení generátoru, připojení externího zdroje pro napájení cívky relé z měřicí stanice CASSY a pro připojení zesíleného výstupního signálu do primárního vinutí transformátoru.

Původní rezistor $10\ \Omega/2\ W$ (viz obrázek 2.2) byl nahrazen rezistorem $100\ \Omega/10\ W$ umístěným na chladiči (viz obrázek 2.22). Při zesíleném výstupním napětí zesilovače by přes rezistor $10\ \Omega/2\ W$ tekla příliš vysoká proud, tudíž by byla na tomto rezistoru vysoká výkonová ztráta, která by mohla rezistor poškodit. Byla zvolena taková hodnota odporu, aby klesl proud tekoucí rezistorem v moment, kdy není hysterezní smyčka vykreslována, tudíž se razantně sníží výkonová ztráta na tomto rezistoru. Na chladiči jsou umístěny dva tyto rezistory. V případě nutnosti je možné tyto rezistory propojit paralelně pro zmenšení výsledného odporu.

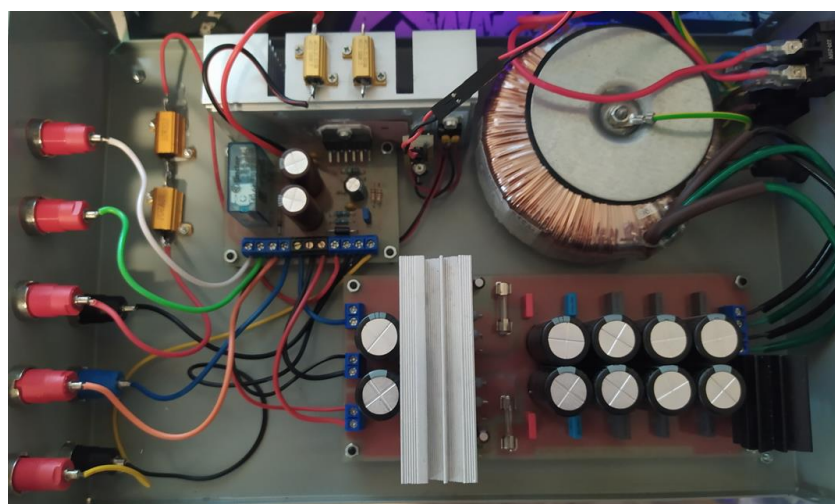
Na obrázku 2.23 je celkové propojení zařízení a banánkových zdířek. Přepínání zapnutí a vypnutí je realizováno pomocí spínače a napájení ze sítě je jištěno 2A pomalou pojistkou. Neživé části jsou pospojovány ochranným vodičem.



Obrázek 2.21: umístění banánkových zdířek



Obrázek 2.22: umístění rezistoru 100 Ω /10 W



Obrázek 2.23: celkové zapojení

Na obrázku 2.24 je zobrazeno, jak jsou vyvrtány otvory pro výdech teplého vzduchu způsobený provozem zdroje a zesilovače. Na druhé straně jsou vyvrtány identické otvory pro vhánění studeného vzduchu aktivního chlazení. Vhánění vzduchu i výdech je zajištěn ventilátorem Sunon EE50101S2-1000U-999. Napájecí napětí ze zdroje je stabilizováno pomocí stabilizátoru 7812 na 12 V pro napájení ventilátorů.



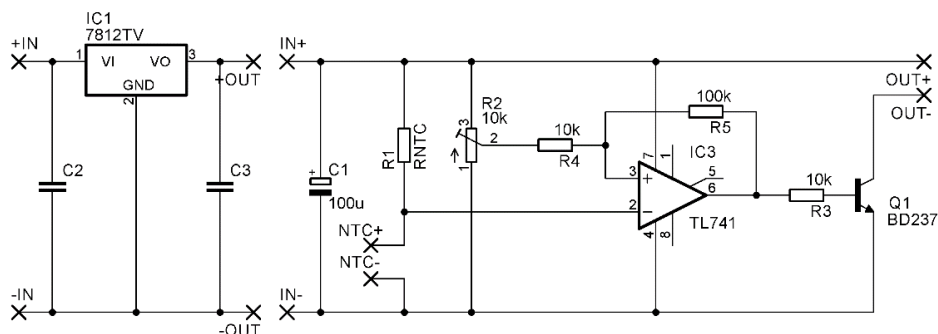
Obrázek 2.24: výdech teplého vzduchu

2.4.1 Řízení ventilátorů

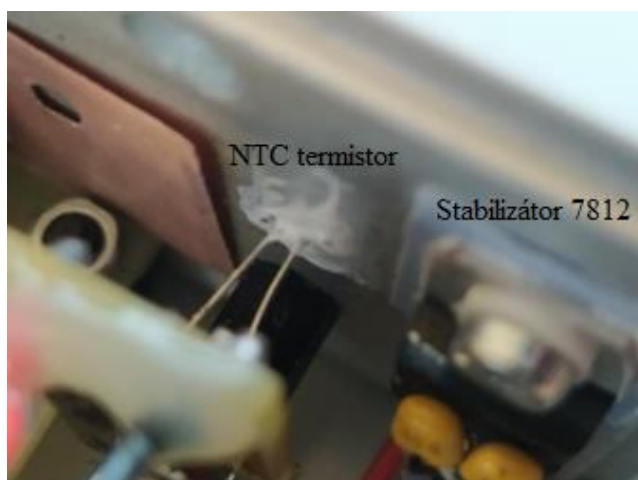
Spínání ventilátorů je řízeno pomocí komparátoru s hysterezí (viz obrázek 2.25). Jako teplotní snímač je využit NTC termistor. Trimrem R_2 se nastavuje hodnota napětí na neinvertujícím vstupu.

NTC termistor je umístěn v chladiči (viz obrázek 2.26), na kterém je umístěn také operační zesilovač LM3886T a stabilizátor 7812. Hodnota rezistoru R_1 a NTC termistoru je $10\text{ k}\Omega$. Tyto součástky tvoří dělič napětí, na invertujícím vstupu je tedy polovina napájecího napětí, resp. 6 V při pokojové teplotě. V moment, kdy zesilovač začne zesilovat a jeho provozem se zvyšuje teplota na chladiči, začne klesat odpor NTC termistoru a tím i napětí na invertujícím vstupu. V moment, kdy hodnota napětí na invertujícím vstupu je nižší než na neinvertujícím vstupu, výstup komparátoru se překlápí do logické 1, otevře se tranzistor Q_1 a ventilátory se zapnou. Chladič se tedy ochlazuje a odpor NTC termistoru opět stoupá. V moment, kdy bude na invertujícím vstupu opět vyšší napětí než na neinvertujícím vstupu, komparátor se překlápí do logické 0 a ventilátory se vypnou.

Teplota sepnutí byla určena pomocí dotyku, aby nedošlo k nechtěnému popálení o chladič.



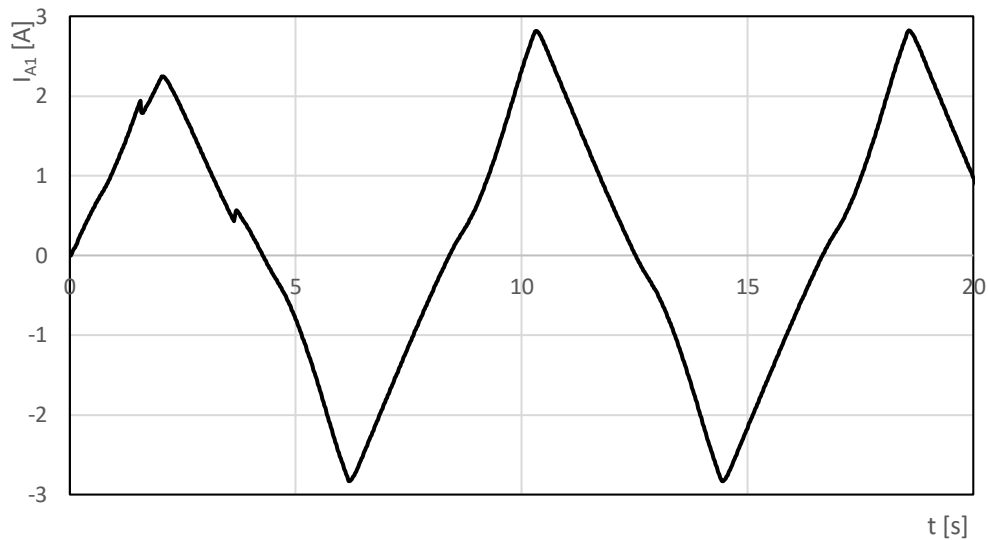
Obrázek 2.25: schéma teplotního snímače



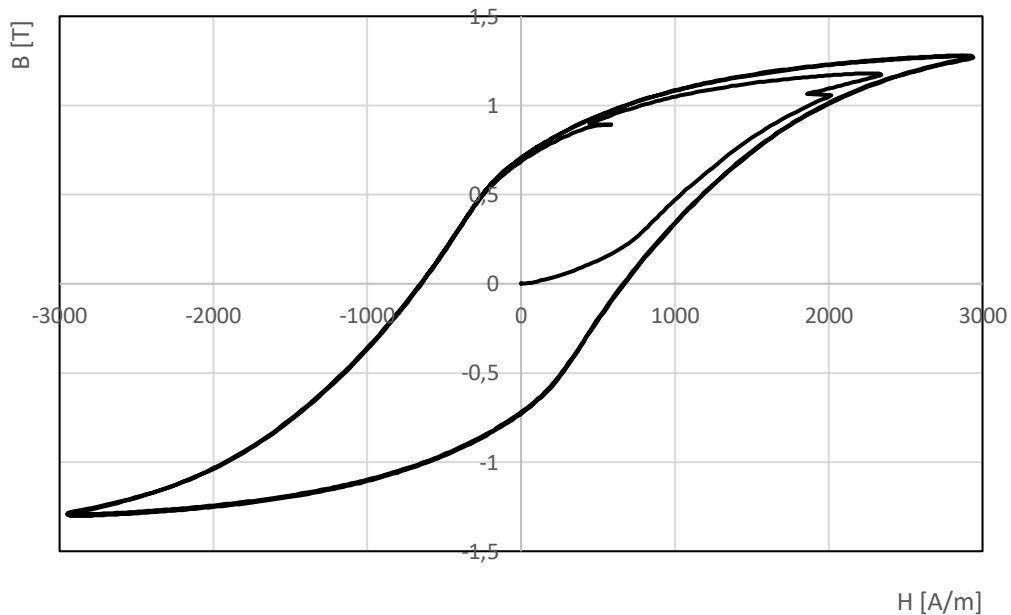
Obrázek 2.26: umístění NTC termistoru v chladiči a stabilizátoru 7812

2.5 Testování kompletního zařízení

Vstupními parametry pro test jsou $U_{gen} = 2,5 \text{ V}$ a $f = 0,1 \text{ Hz}$. Při finálním testu byla objevena řešitelná komplikace, kdy lze na obrázku 2.28 vidět, že při prvotním magnetování jádra je proud sytící jádro omezen (viz obrázek 2.27), a tudíž nedojde k plnému nasycení jádra. Při dalším magnetování tento jev již nenastává. Proud je pravděpodobně omezen integrovanou teplotní ochranou nebo přepětovou ochranou operačního zesilovače LM3886T nebo jinými jevy, které nebylo možné analyzovat.



Obrázek 2.27: omezení proudu tekoucího do primární cívky



Obrázek 2.28: projevení omezeného proudu na hysterezní smyčce

Řešením bylo připojení dvou rezistorů $2\ \Omega/10\ \text{W}$ sériově k výstupu. Rezistory jsou uchyceny na hliníkovou krabičku z důvodu chlazení, jak je zobrazeno na obrázku 2.29.

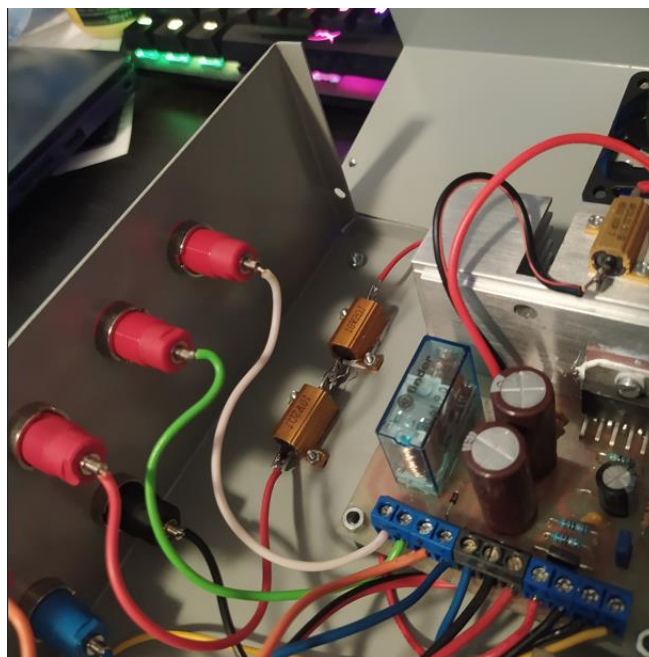
Vzhledem k tomu, že ve výsledku je na výstupu větší odpor (zátěž), a to $6,5\ \Omega$, muselo být zvýšeno zesílení zesilovače z $A = 3$ [-] na $A = 5$ [-], aby výstupní napětí mělo dostatečnou hodnotu. Tudíž by z výstupu zesilovače tekla požadovaný proud $3\ \text{A}$ dle vztahu 2.8. Byl vyměněn pouze zpětnovazební rezistor R_3 $2\ \text{k}\Omega$ za $3,9\ \text{k}\Omega$ (viz obrázek 2.16). Zesílení po výměně zpětnovazebního rezistoru je tedy:

$$A = 1 + \frac{R_3}{R_4} = 1 + \frac{3900}{1000} = 4,9 \text{ [-]}, \quad (2.7)$$

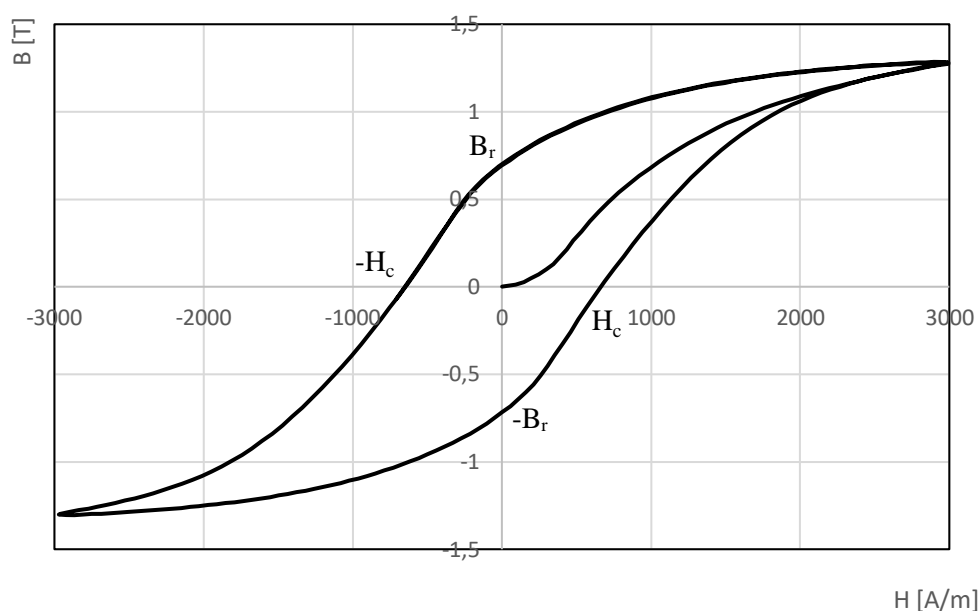
a tudíž potřebná úroveň výstupního napětí zesilovače a napětí na generátoru je:

$$U = R_{\text{zátěž}} \cdot I = 6,5 \cdot 3 = 19,5\ \text{V} \quad (2.8)$$

$$U_{\text{gen}} = \frac{U}{A} = \frac{19,5}{4,9} = 3,98\ \text{V} \quad (2.9)$$



Obrázek 2.29: umístění výstupních rezistorů



Obrázek 2.30: hysterezní smyčka po vyřešení komplikací

Měřením bylo potvrzeno, že připojením rezistorů na výstup zesilovače byla komplikace vyřešena, jak lze vidět na obrázku 2.30. Při měření hysterezní smyčky se zesilovačem dojde k plnému nasycení jádra. Potřebná intenzita magnetického pole se pohybuje kolem 3000 A/m. Při měření hysterezní smyčky litého jádra pouze s výkonovým generátorem docházelo k zákmitům už při intenzitě magnetického pole kolem 1300 A/m.

2.5.1 Měření hysterezní smyčky litého jádra s finálním zařízením

Zařízení je tedy funkční a bylo možno určit parametry litého jádra. Z hysterezní smyčky na obrázku 2.30 byly určeny parametry jako remanentní indukce B_r a koerzivní síla H_c . Tedy $B_r = 0,69$ T, $H_c = 629$ A/m.

Dále je možné určit ztráty litého jádra. Při frekvenci 0,1 Hz lze zanedbat ztráty vířivými proudy. Pro určení hysterezních ztrát byla nejdříve určena plocha hysterezní smyčky S_S , která činí 4440,6 J/m³. Objem litého jádra V dle katalogového listu činí $2,4 \cdot 10^{-4}$ m³ a hmotnost litého jádra m je 5,97 kg. Z těchto hodnot bylo možno vypočítat hysterezní ztráty feromagnetika dle vztahu 1.15, celkové ztráty P a měrné ztráty p dle vztahů 1.14 a 1.17 [22]:

$$P_h = V \cdot S_S \cdot f = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot 4440,6 \cdot 0,1 = 0,1066 \text{ W} \quad (2.9)$$

Vzhledem k tomu, že se hysterezní ztráty nejvíce podílí na celkových ztrátách feromagnetika, lze usoudit, že hysterezní ztráty zhruba odpovídají celkovým ztrátám, tudíž $P \approx P_h$. Měrné ztráty jsou vypočteny podle vztahu 1.17:

$$p = \frac{P}{m} = \frac{0,1066}{5,97} = 0,0179 \text{ W/kg} \quad (2.10)$$

ZÁVĚR

Hlavní náplní práce je zlepšení měření hysterezní smyčky litého jádra a jádra z transformátorových plechů. Obě jádra jsou sycena signálem z výkonového generátoru. Použitý generátor signálu není vhodný pro měření litého jádra, jelikož má nedostačující výstupní výkon. Řešení problému spočívá v návrhu a konstrukci zesilovače zesilující signál generátoru. Po jeho realizaci byl zesilovač otestován, zda je vhodný pro dané měření. V poslední části bylo opět provedeno měření hysterezní smyčky se zapojeným zesilovačem.

Měření a následné zobrazení hysterezní smyčky jádra z transformátorových plechů proběhlo bez problémů. Z prvotního měření je patrné, že výkonový generátor vykazuje stejnosměrný posuv, kvůli kterému se výsledné hysterezní smyčky nepřekrývají. Tyto smyčky jsou od sebe posunuty podle směrnice přímky, která je naznačena na obrázku 2.5. Výpočtem bylo zjištěno, že směrnice k je $-0,0016$. Při přičtení přímky s opačnou směrnici bylo možné provést korekci stejnosměrného posuvu a výsledné hysterezní smyčky se překrývají.

Jelikož lité jádro není složeno z izolovaných plechů, má obecně mnohem vyšší hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. V tomto případě se ztráty vířivými proudy prakticky neprojeví, jelikož je jádro syceno signálem o frekvenci $0,1$ Hz. Pro plné nasycení litého jádra je nutné zvýšení elektrického proudu tekoucí primárním vinutím, jelikož je na tomto proudu závislá intenzita magnetického pole. Při zvýšení napětí na výkonovém generátoru však začaly vznikat zákmity na hysterezní smyčce, z čehož lze usoudit, že výkonový generátor není dostatečně výkonný pro nasycení litého jádra.

Pro zjištění proudu, který je nutný pro nasycení litého jádra, byl místo výkonového generátoru zapojen laboratorní zdroj Diametral P230R51D. Na laboratorním zdroji bylo nastaveno proudové omezení 3 A, aby byl dodržen proudový rozsah měřicí stanice CASSY. Z křivky prvotní magnetizace v obrázku 2.12 je patrné, že tento proud je dostatečný i pro nasycení litého jádra. Aby bylo dosaženo tohoto cíle, je možno zvýšit proud tekoucí primární cívkou, tedy proud generátoru, který sytí lité jádro. Výstupní signál z výkonového generátoru je tvarově v pořádku, byl tedy uvažován návrh zvýšení velikosti proudu neinvertujícím zesilovačem s OZ LM3886T se zesílením $A = 3$ [-]. S touto konfigurací byl sestaven prototyp zesilovače na univerzální DPS a byl změřen výstupní signál zesilovače (viz obrázek 2.14). Signál z generátoru byl dostatečně zesílen, proto byla s tímto prototypem změřena hysterezní smyčka litého jádra (viz obrázek 2.15). Lité jádro bylo plně nasyceno. Prototyp zesilovače tedy vyhovoval měření a mohl být realizován jako samostatné zařízení.

Byla tedy vyrobena finální DPS. Při testu finálního zařízení bylo zjištěno, že při vykreslování křivky prvotní magnetizace dochází k omezování proudu tekoucího primárním vinutím a jádro není plně nasyceno. Při opětovném magnetování k tomuto jevu již nedochází. Je to pravděpodobně způsobeno integrovanými ochranami operačního

zesilovače LM3886T. Tento problém byl vyřešen tak, že na výstup zesilovače byly do série zapojeny dva výkonové rezistory $2 \Omega/10 \text{ W}$. Kvůli zvýšenému odporu bylo nutné zvýšit zesílení zesilovače, aby byl zesilovač schopen dodávat požadovaný proud 3 A . Zesílení zesilovače bylo tedy zvýšeno z původního $A = 3 [-]$ na $A = 5 [-]$.

Pro napájení operačního zesilovače byl navržen symetrický zdroj napětí s výstupním napětím $\pm 25 \text{ V}$. Pro tento zdroj byla taktéž vyrobena DPS.

Aktivní chlazení zařízení je realizováno pomocí dvou ventilátorů, jež jsou přimontovány na hliníkovou krabičku, v níž jsou uloženy DPS zesilovače a symetrického zdroje. První ventilátor nasává studený vzduch z okolí, druhý ventilátor slouží jako výdech horkého vzduchu. Oba ventilátory jsou napájeny ze symetrického zdroje a potřebná hodnota napětí 12 V je stabilizována pomocí obvodu 7812. Ovládání těchto ventilátorů je realizováno pomocí obvodu obsahující komparátor s hysterezí, který překlápí stav svého výstupu v závislosti na teplotním čidle a na referenčním napětí na neinvertujícím vstupu, které bylo nastaveno pomocí trimru. Teplotní čidlo je vloženo v hliníkovém chladiči.

Další možností, jak zvýšit intenzitu magnetického pole sytící jádro je spojení primární a sekundární cívky do série, kdy dojde ke zvýšení počtu závitů a tím ke zvýšení intenzity magnetického pole při stejné velikosti elektrického proudu. Pro měření napětí by bylo tedy nutné navinout novou měřicí cívku. Touto cestou se ale bakalářská práce nevydala.

LITERATURA

- [1] MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Elektrotechnické materiály I*. [online]. 1. Praha: VOŠ a SPŠ elektrotechnická Františka Křížka, 2016 [cit. 2021-11-01]. ISBN 978-80-88058-90-8. Dostupné z: <https://publi.cz/epubli/book/353-elektrotechnicke-materialy-i>
- [2] URBANOVÁ, Marie a Jaroslav HOFMANN. *Fyzika I* [online]. 3. vydání. Praha: VŠCHT, 2011 [cit. 2021-11-01]. ISBN 978-80-7080-777-4. Dostupné z: https://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid_isbn-978-80-7080-777-4
- [3] CÍDLOVÁ, Hana, Zuzana MOKRÁ a Barbora VALOVÁ. *Obecná chemie* [online]. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2018 [cit. 2021-11-01]. Elportál. Dostupné z: <http://is.muni.cz/elportal/?id=1412124> ISBN 978-80-210-8953-2. ISSN 1802-128X
- [4] DIVIŠ, Josef. *Základy elektrotechniky*. SPŠE Mohelnice [online]. Mohelnice [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zae/index.htm>
- [5] *Elektrotechnika: Základy elektrotechniky* [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/456>
- [6] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika. 2.*, nezm. vyd. Praha: Informatorium, 1997. ISBN 80-860-7318-1.
- [7] FOJTEK, Alois. *Fyzika pro HGF*. Dot. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1996. ISBN 80-707-8031-2.
- [8] JILES, David. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2015. ISBN 148223887X.
- [9] *Magnetic intensity - understand its definition, calculations and key points*. Testbook [online]. [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://testbook.com/learn/physics-magnetic-intensity/>
- [10] JIRÁK, Josef, Rudolf AUTRATA, Karel LIEDERMANN, Zdenka ROZSÍVALOVÁ a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. *Materiály a technická dokumentace: Část Materiály v elektrotechnice*. Unium [online]. Brno, 2004, 7. 8. 2004 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/skripta-materialy-v-elektrotechnicie-m10682-p1.html?fbclid=IwAR0cPdxXuX8ju4ZLBfhlF9SsQLjip-GPL5m3DR-4a2j1EKkGJAEtMuusDU>
- [11] CARDIAS, R, A SZILVA, A BERGMAN, et al. *The Bethe-Slater curve revisited; new insights from electronic structure theory*. Scientific reports [online]. LONDON: NATURE PUBLISHING GROUP, 2017, 7(1), 1-11 [cit. 2021-11-09]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-017-04427-9
- [12] CHLADIL, Ladislav. *Přednáška 7: Magnetické materiály. Elektrotechnické materiály a výrobní procesy I* [online prezentace]. 2020, 67 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: https://moodle-archiv-2019-2020.ro.vutbr.cz/pluginfile.php/252279/mod_resource/content/2/P%C5%99edn%C3%A1%207_Magnetick%C3%A9%20materi%C3%A1ly.pdf

- [13] 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.
- [14] Ztráty v transformátoru. *Informační portál energetické gramotnosti* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://www.informacni-portal.cz/clanek/ztraty-v-transformatoru>
- [15] *Fyzikální princip měření magnetického pole & SQUID & MPMS XL magnetometr* [online]. UP Olomouc, 2009 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/squid.pdf>
- [16] BEJČEK, Ludvík, Miroslav ČEJKA, Jiří ŘEZ, Eva GESCHIEDTOVÁ a Miroslav STEINBAUER. *Měření v elektrotechnice*. Unium [online]. Brno [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/mereni-v-elektrotechnice-m10315-p1.html>
- [17] Encyklopedie fyziky. *Hallův jev* [online]. 2006 [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev>
- [18] *Recording the initial magnetization curve and the hysteresis curve of a ferromagnet* [online]. In: . Huerth: LD DIDACTIC [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P7/P7321cle.pdf?__hstc=98968833.32ccf91683035bba9bfea7074c0bd823.1634638912074.1639083560817.1639176357353.14&__hssc=98968833.1.1639176357353&__hsfp=3010427306&_ga=2.161364031.30304095.1639176357-310347343.1634638911
- [19] Sensor-CASSY 2 - *Recording the initial magnetization curve and the hysteresis curve of a ferromagnet and iron* [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://www.leybold-shop.com/physics/physics-experiments/solid-state-physics/magnetism/ferromagnetic-hysteresis/recording-the-initial-magnetization-curve-and-the-hysteresis-curve-of-a-ferromagnet-and-iron/sensor-cassy-2-524013.html>
- [20] *LM3886 Overture™ Audio Power Amplifier Series High-Performance 68W Audio Power Amplifier w/Mute* [online]. 2013 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3886.pdf?ts=1653781158533>
- [21] LT1083. *Analog devices* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: www.linear.com/LT1083
- [22] *Eisen-U-Kern mit -Joch*. Leybold [online]. [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/GA/GA/5/562/562115d.pdf?__hstc=98968833.f68bb4b52daffa0a6e6fbb533e7a7e51.1653898809786.1653898809786.1653901514572.2&__hssc=98968833.2.1653901514572&__hsfp=2827925520&_ga=2.162319675.668562093.1653898809-982423317.1653898809

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

AD převodník	analog na digital převodník
DMA/RAM	direct memory access/random access memory
OZ	operační zesilovač
S/H	sample hold obvod

Symboly:

U_i	indukované elektrické napětí na cívce	(V)
Φ	magnetický tok	(Wb)
t	čas	(s)
I	elektrický proud	(A)
L	indukčnost cívky	(H)
μ	permeabilita	(H/m)
μ_0	permeabilita vakua	(H/m)
μ_r	relativní permeabilita	(-)
N	počet závitů cívky	(H/m)
S_c	průřez cívky	(m ²)
l_c	délka cívky	(m)
W_m	energie cívky	(J)
B	magnetická indukce	(T)
F	síla	(N)
Q	náboj pohybující se v magnetickém poli	(C)
v	rychlost náboje v magnetickém poli	(m/s)
χ_m	magnetická susceptibilita	(-)
H	intenzita magnetického pole	(A/m)
r	vzdálenost od osy vodiče	(m)
P	celkové ztráty feromagnetika	(W)
P_h	hysterezní ztráty feromagnetika	(W)
P_v	ztráty vířivými proudy	(W)
P_z	ztráty magnetickým zpožděním	(W)
V	objem feromagnetika	(m ³)
ρ	rezistivita materiálu	(Ω m)
k	činitel tvaru křivky indukovaného napětí	(-)
h	tloušťka feromagnetického materiálu	(m)
f	frekvence střídavého magnetického pole	(Hz)
p	měrné ztráty	(W/kg)
m	hmotnost feromagnetického materiálu	(kg)
u_h	Hallovo napětí	(V)

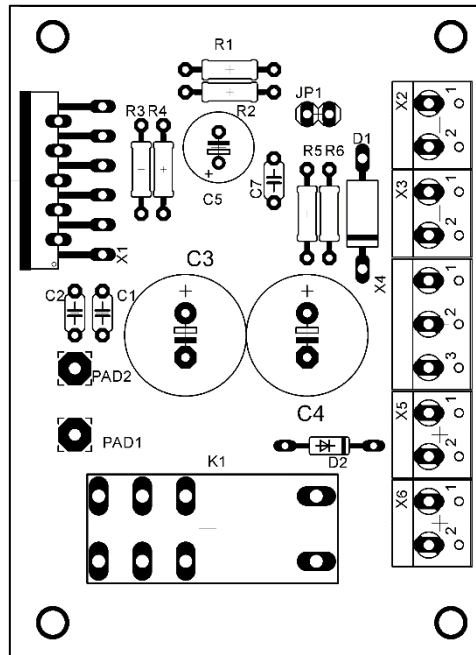
R_h	Hallova konstanta	(m ³ /C)
d	tloušťka destičky	(m)
I_m	magnetizační proud	(A)
R	velikost odporu rezistoru RC členu	(Ω)
ω	úhlová rychlost	(rad/s)
C	kapacita kondenzátoru RC členu	(F)
U_{B1}	napětí naprázdno na sekundární cívce	(V)
S	průřez jádra	(m ²)
I_{A1}	proud tekoucí primární cívkou	(A)
N_1	počet závitů primární cívky	(-)
N_2	počet závitů sekundární cívky	(-)
l_s	střední délka siločáry	(m)
U_{gen}	napětí výkonového generátoru	(V)

SEZNAM PŘÍLOH

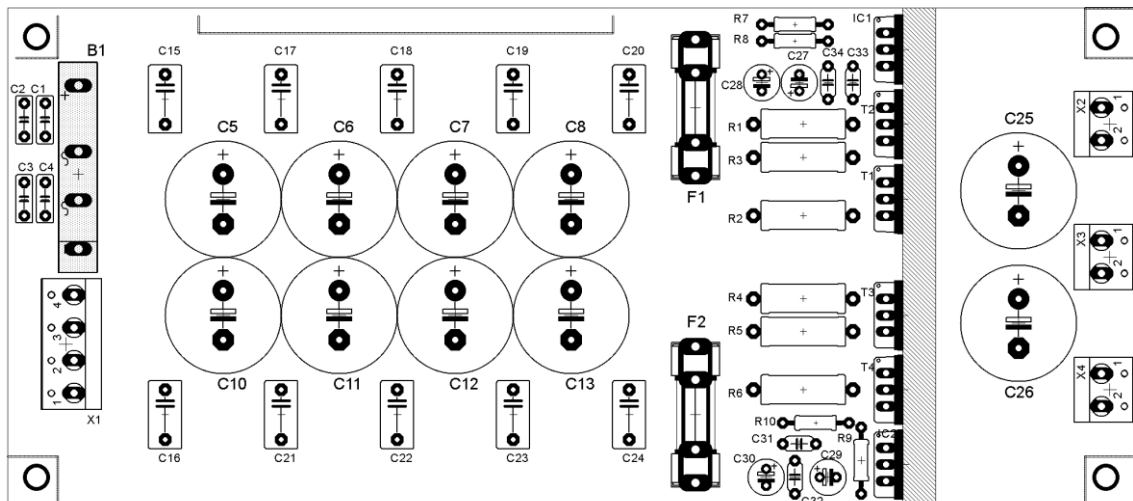
PŘÍLOHA A - DPS ZESILOVAČE A ZDROJE	54
PŘÍLOHA B - LAYOUT DPS	55

Příloha A - DPS zesilovače a zdroje

A.1 Rozmístění součástek na DPS zesilovače

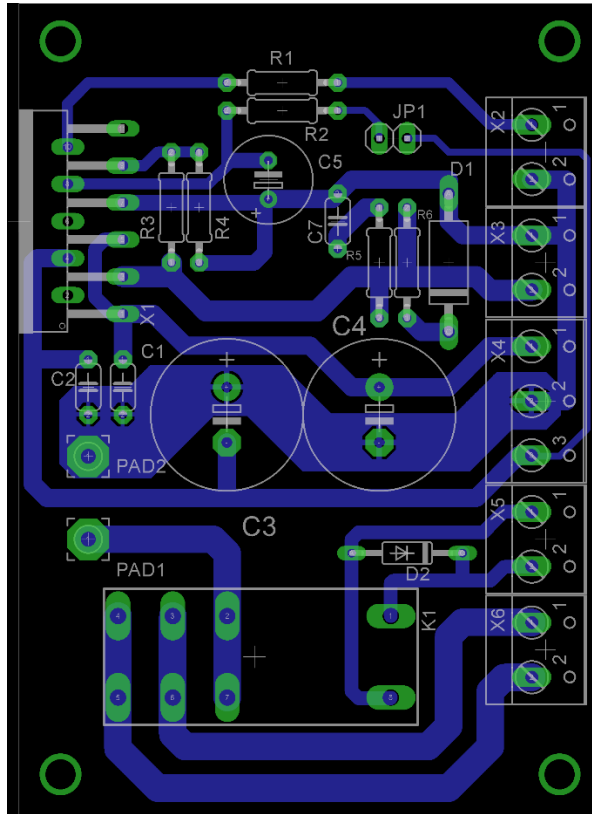


A.2 Rozmístění součástek na DPS zdroje



Příloha B - Layout DPS

B.1 Layout DPS zesilovače



B.2 Layout DPS zdroje

