

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Počítačem řízený permeametr

Praha, 2013

Autor: Bc. Pavel Vitvar

Vedoucí práce: Ing. Josef Sedláček, CSc.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. VITVAR Pavel**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika

Název tématu: **Počítačem řízený permeametr**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Provedte analýzu obvodového řešení stávajícího analogového permeamtru používaného pro měření kvazistatické hysterezní smyčky magneticky měkkých materiálů.
- 2) Navrhněte digitalizaci dílčích komponent permeamtru umožňující řízení měřicího procesu a zpracování dat osobním počítačem.
- 3) Realizujte software pro zpracování naměřených dat na osobním počítači.

Seznam odborné literatury:

- [1] Davídek, V., Laipert, M., Vlček, M.: Analogové a číslicové filtry, skriptum, vydavatelství ČVUT, Praha, 2004.
- [2] Haasz, V., Sedláček, M.: Elektrická měření - přístroje a metody, skriptum, vydavatelství ČVUT, Praha, 2003.
- [3] Sedláček, J.: Materials and Technology for Electronics – Exercises, skriptum, vydavatelství ČVUT, Praha, 2007.
- [4] Spaldin, N.: Magnetic Materials, Fundamentals and Device Application, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.

Vedoucí: **Ing. Josef Sedláček, CSc.**

Platnost zadání: 31. 8. 2014

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 7. 2. 2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne _____

podpis

Poděkování

Děkuji Ing. Josefu Sedláčkovi, CSc. za odborné vedení diplomové práce a za cenné rady.

Abstrakt

Tato diplomová práce popisuje návrh stavby zařízení pro měření permeability magneticky měkkých a polotvrdých feromagnetických materiálů, měřením hysterezní smyčky při velmi nízkých kmitočtech budícího pole. Permeametr společně se zapisovačem křivky připojeným k osobnímu počítači tvoří funkční celek pracoviště pro měření vzorků feromagnetických materiálů. V práci jsou využity zkušenosti s měřením na komerčních přístrojích na katedře měření a katedře elektrotechnologie FEL ČVUT.

Abstract

This thesis describes the construction design of device for measuring the electromagnetic permeability of soft and semi-hard ferromagnetic materials. It uses hysteresis loop measurement at very low frequencies of the excitation field. Permeameter along with a hysteresis loop recorder connected to a personal computer form a measuring workplace for ferromagnetic material samples. The thesis uses experiences with commercial devices at the Department of Measurement and at the Department of Electrotechnology CTU.

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
Seznam použitých zkratk	xii
1 Úvod	1
2 Teoretický úvod	2
2.1 Magnetická indukce	2
2.2 Intenzita magnetického pole	3
2.3 Definice permeability	3
2.4 Hysterezní smyčka	5
2.4.1 Kvazistatická a dynamická smyčka	6
2.4.2 Ztráty v magnetiku	6
2.4.2.1 Ztráty vířivými proudy	6
2.4.2.2 Ztráty hysterezní	6
2.4.2.3 Ztráty dodatkové	7
3 Přehled typů přístrojů	8
3.1 Varianty měřících zařízení	8
4 Rešerše původního řešení	10
4.1 Měřící skříň	10
4.1.1 Mechanika	10
4.1.2 Měřený vzorek	11
4.1.2.1 Jho	11
4.1.2.2 Budící cívky	11

4.1.2.3	Měřicí cívka	11
4.1.2.4	Hallova sonda	12
4.1.3	Řídící elektronika	12
4.1.3.1	Výstupní zesilovač	12
4.1.3.2	Korekční obvod	13
4.2	Zobrazovací část	14
4.2.1	Zdroj	14
4.2.2	Měřicí obvody Hallovy sondy	14
4.2.3	Řízení permeamtru	14
4.2.4	DAC pro výstup a zobrazení B	15
4.2.5	ADC pro zobrazení H	16
4.3	Nevýhody	16
5	Autorské řešení	17
5.1	Varianty řešení	17
5.1.1	Analogový měřicí přístroj	17
5.1.2	Softwarově definovaný měřicí přístroj	18
5.1.3	Analogově digitální měřicí přístroj	18
5.2	Zvolené řešení	18
5.2.1	Generátor signálu	18
5.2.2	Výkonový stupeň	19
5.2.3	Analogový integrátor	20
5.2.4	Napájecí zdroj	21
5.2.5	AD a DA převodníky	22
5.2.6	Měření	23
5.2.6.1	Měření hysterezní smyčky	24
5.2.6.2	Měření křivky prvotní magnetizace	24
6	Zpracování dat a výsledky měření	26
6.1	Zapisovač	26
6.1.1	Parametry zapisovače	26
6.2	Ovládací software	27
6.2.1	Funkce Detect Intersections	30
6.2.2	Nabídka View Settings	31
6.2.3	Nabídka HW Settings	32

6.3	Zpracování dat	32
6.4	Odhad a odstraňování systémových chyb měření	33
6.4.1	Teplotní drift	33
6.4.2	Vliv vnějších statických magnetických polí	33
6.4.3	Vliv vnějších střídavých magnetických polí	33
6.4.4	Vliv nedokonalostí vzorku	34
6.5	Možnosti úprav	34
7	Závěr	35
	Literatura	36
A	Charakteristiky	I
B	Elektronická schémata	VIII
C	Fotodokumentace	XVIII
D	CD-ROM	XX

Seznam obrázků

2.1	Průběh permeability polotvrdého feromagnetika [9]	4
2.2	Hysterezní smyčka	5
4.1	Schéma zapojení původního permeamtru	13
5.1	Schéma permeamtru	19
5.2	Schéma integrátoru	22
5.3	Schéma zdroje	23
6.1	Grafické uživatelské rozhraní ovládacího SW	28
6.2	Funkce Detect Intersections	30
6.3	Nabídka View Settings	31
6.4	Nabídka HW Settings	32
A.1	Hysterezní smyčka materiálu 2C	I
A.2	Hysterezní smyčka materiálu 2C uložená z ovládacího SW.	II
A.3	Křivka prvotní magnetizace materiálu 2C	III
A.4	Hysterezní smyčka materiálu 16420	IV
A.5	Hysterezní smyčka materiálu 16420 uložená z ovládacího SW.	V
A.6	Hysterezní smyčka materiálu 2002.1	VI
A.7	Hysterezní smyčka materiálu 2002.1 uložená z ovládacího SW.	VII
B.1	Schéma měřící části	IX
B.2	Schéma zobrazovací části	X
B.3	Schéma zdroje	XI
B.4	Schéma desky A zobrazovací části	XII
B.5	Schéma desky B zobrazovací části	XIII
B.6	Schéma desky C zobrazovací části	XIV
B.7	Schéma desky D zobrazovací části	XV

B.8	Schéma desky E zobrazovací části	XVI
B.9	Schéma modernizovaného zdroje	XVII
C.1	Fotografie zapisovače	XIX

Seznam tabulek

3.1	Specifika měřících metod [5]	9
4.1	Elektrické vlastnosti budících cívek	11
4.2	Elektrické vlastnosti měřící cívky	12
4.3	Označení vstupů a výstupů desky A ve schématu	15
5.1	Vlastnosti OZ LTC1050	21
5.2	Popis základní příkazové sady pro ovládání permeamtru	24
6.1	Parametry zapisovače	27
6.2	Popis tlačítek a funkčních prvků pro příjem a zobrazení dat v hlavním okně programu LS Oscilo	28
6.3	Popis tlačítek pro práci se získanými daty v hlavním okně programu LS Oscilo	29

Seznam použitých zkratek

- AD: Analogově digitální
- ADC: Analog-to-Digital Converter (Analogově číslicový převodník)
- ASCII: American Standard Code for Information Interchange
- BMP: Windows Bitmap
- BP: Bakalářská práce
- CMOS: Complementary Metal-Oxide Semiconductor
- CMRR: Common Mode Rejection Ration
- CSV: Comma Separated Values (Čárkou oddělené hodnoty)
- CTU: Czech Technical University
- ČVUT: České Vysoké Učení Technické
- DA: Digitálně analogový
- DAC: Digital-to-Analog Converter (Digitálně analogový převodník)
- DP: Dolní propust
- DPS: Deska plošných spojů
- FEL: Fakulta Elektrotechnická
- GUI: Graphical User Interface (Grafické uživatelské rozhraní)
- HW: Hardware
- JFE: Junction Field Effect (Typ tranzistoru)

- LAMM: Laboratoř Magnetických Měření
- LCD: Liquid Crystal Display
- MOS: Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect (Typ tranzistoru)
- OZ: Operační zesilovač
- PC: Personal Computer (Osobní počítač)
- PSRR: Power Supply Rejection Ratio
- RXD: Received Data (Příjem dat)
- THD: Total harmonic distortion (Celkové harmonické zkreslení)
- TTL: Transistor-Transistor Logic
- TXD: Transmit Data (Vysílání dat)
- SW: Software
- USB: Universal Serial Bus

Kapitola 1

Úvod

Znalost základních parametrů magnetických materiálů, případně jejich manifestace v souvislosti se strukturními vlastnostmi magnetika, poskytuje konstruktérům zařízení, využívajících magnetické obvody, jejich efektivní návrh. Měření těchto parametrů patří k základním znalostem studentů elektrotechnických oborů vysoké školy. Na katedře mechaniky materiálů byl vyvinut a nyní na katedře elektrotechnologie je řadu let používán permeametr umožňující stanovení základních vlastností fero-(feri-)magnetika na základě měření jeho kvazistatické hysterezní smyčky.

Přesné měření permeability materiálů je výborně zvládnuté u toroidních vzorků nebo tenkých plechů. V případě, že není technologicky možné vzorek požadovaně vytvářet, nastupuje metoda měření ve jhu. Permeametr, který postavil ing. Michal Mikulec a ze kterého vycházím, již z dnešního pohledu nespĺňuje potřeby pro snadnou obsluhu studenty v laboratoři a je vhodné jej modernizovat.

Výše zmíněný permeametr byl realizován na bázi analogových obvodových celků. Předložená práce si klade za cíl návrh zařízení s obdobnými vlastnostmi jako má zařízení stávající, s tím, že měřící proces a záznam naměřených výsledků jakož i jejich zpracování bude realizováno pomocí softwaru instalovaného na řídicím PC. Rámcové parametry jsou:

- Měření magneticky měkkých materiálů s relativní permeabilitou do 2000.
- Maximální intenzita pole je stanovena na $3 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$.
- Měřicí kmitočet je 33,3 mHz.

Kapitola 2

Teoretický úvod

Vlastnosti feromagnetických materiálů můžeme popisovat různými parametry. Jedním z důležitých parametrů je maximální relativní permeabilita. Pro různé specifické použití feromagnetických materiálů, například pro analogový záznam zvukových signálů, mohou být výhodnější hodnoty inkrementální permeability. Pro aplikace ve výkonové elektronice je významná hodnota maximální. Dalším parametrem je velikost remanentní a sytné indukce, které jsou důležité při přemagnetování nebo použití materiálu jako permanentního magnetu.

Velikost koerzivní síly a remanence jsou určující pro množství ztrát v materiálu.

Výše zmíněné vlastnosti jsou často závislé na frekvenci budícího pole a je zajímavé se jim věnovat a měřit je při různých kmitočtech. Při dostatečném omezení kmitočtu je možné od sebe oddělit jednotlivé jevy, které v materiálu při magnetování probíhají a díky tomu hodnotit materiál komplexněji.

U některých typů materiálu je také zajímavá anizotropie. Tou se bohužel nebudu v práci dále zabývat.

2.1 Magnetická indukce

Měření velikosti magnetické indukce se provádí podle Faradayova indukčního zákona

$$\oint_C \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} \quad (\text{Vm}^{-1}), \quad (2.1)$$

kde \mathbf{E} je intenzita elektrického pole ve vzorku, \mathbf{l} je vzdálenost na orientované křivce kolem vzorku, \mathbf{B} je indukce ve vzorku a \mathbf{S} je plocha průřezu vzorku.

Měřicí cívka je těsně navinuta kolem měřeného vzorku a lze tedy předpokládat, že magnetický indukční tok cívkou odpovídá indukci v celé ploše řezu vzorkem v rovině kolmé na směr magnetických siločar. Zjednodušením vztahu 2.1 tak dostáváme výraz

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} \quad (\text{Wb}), \quad (2.2)$$

kde Φ je magnetický indukční tok vzorkem.

Změny magnetického toku vyvolávají indukované napětí v měřicí cívce

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{V}), \quad (2.3)$$

kde U_i je napětí na cívce, která není připojena k zátěži.

Z výše zmíněných vztahů vyplývá, že napětí indukované v cívce je přímo úměrné změně velikosti změny indukce ve vzorku. Z této úvahy vyplývá, že budící pole musí být za všech okolností proměnlivé.

2.2 Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole je měřena pomocí Hallova jevu. Využívá se jevu, kdy je tečná složka intenzity shodná na obou stranách rozhraní tedy uvnitř i vně vzorku. Tento typ měření je možný použít pouze u magneticky měkkých vzorků, protože se vzdáleností od vzorku klesá intenzita a měření je příliš zkreslováno. Pro měření je použita mini-aturní sonda umístěná ve stěně cívky obklopující vzorek. Materiály obklopující sondu mají relativní permeabilitu velmi blízkou jedné a neovlivňují tak měření. Sonda má poměr výstupního napětí k indukci 25 V/T a pro získání intenzity pole se provádí pouze vydělení hodnotou permeability vakua.

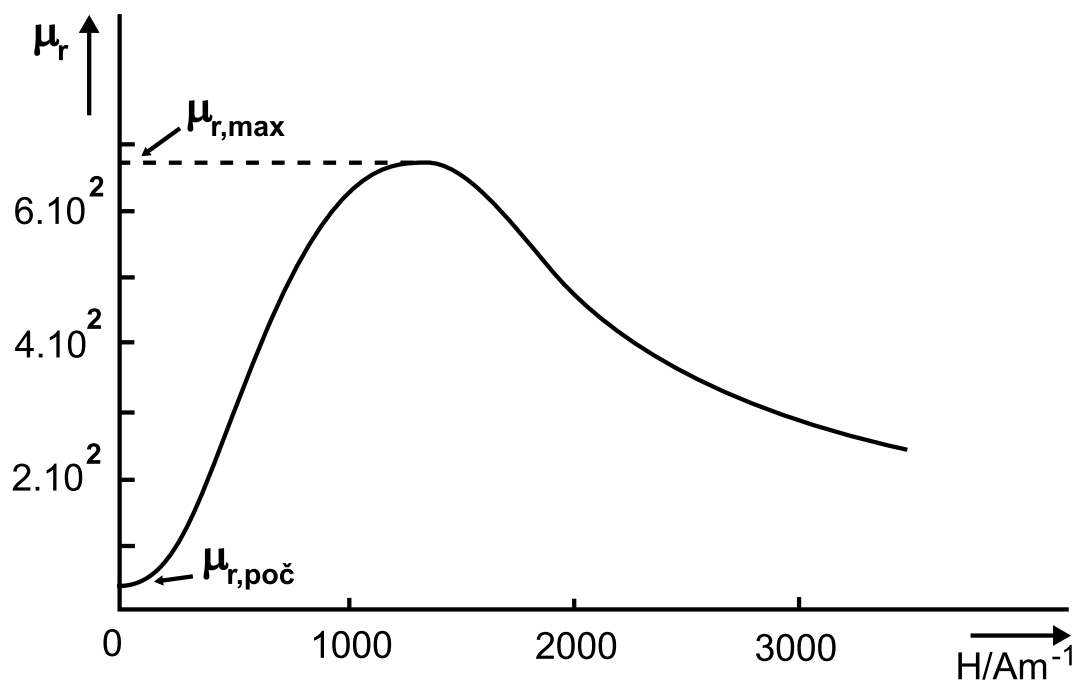
2.3 Definice permeability

Permeabilita μ je fyzikální veličina tenzorového charakteru, která vyjadřuje vliv materiálového prostředí na účinky aplikovaného magnetického pole. Permeabilitu lze vyjádřit

z Maxwellova materiálového vztahu

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad (\text{T}). \quad (2.4)$$

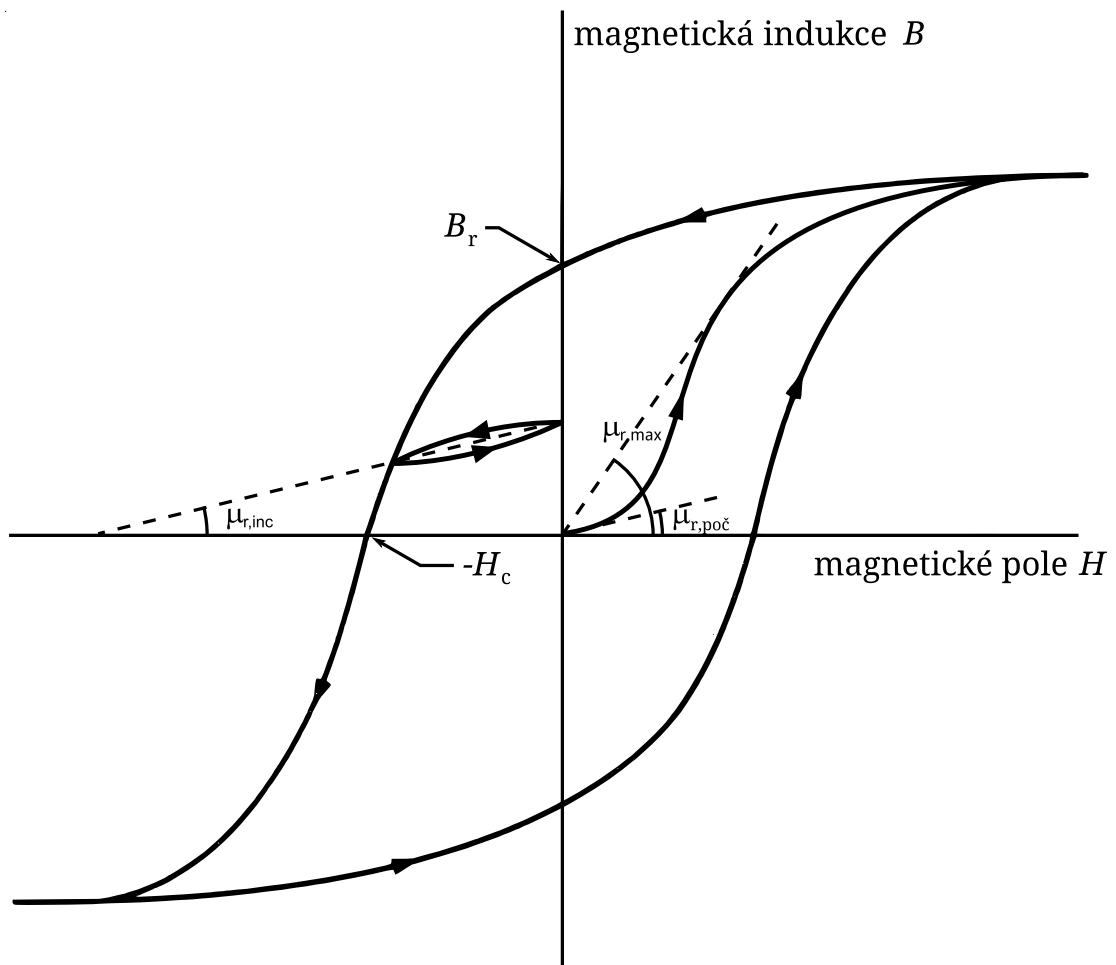
Z hlediska technických aplikací se pro popis chování fero-(feri-)magnetika nejčastěji používají veličiny jako je absolutní permeabilita μ , počáteční relativní permeabilita $\mu_{r,poc}$, inkrementální permeabilita $\mu_{r,inc}$, maximální relativní $\mu_{r,max}$ a permeabilita vakua μ_0 viz 2.1. Pro kvalitativní zhodnocení fero-(feri-)magnetických materiálů je nejdůležitější počáteční permeabilita. Obecně lze říci, že každá aplikace vyžaduje jiný náhled na permeabilitu.



Obrázek 2.1: Průběh permeability polotvrdého feromagnetika [9]

2.4 Hysterezní smyčka

Závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole u fero a ferimagnetických materiálů není lineární, jak již bylo řečeno v předešlé podkapitole a je patrné z obr. 2.2.



Obrázek 2.2: Hysterezní smyčka

Na křivce je významný bod v počátku souřadnic. U demagnetizovaného vzorku bude při zvyšování intenzity magnetického pole bod v grafu opisovat takzvanou křivkou prvotní magnetizace. V jejím počátku má její tečna sklon, který definuje počáteční permeabilitu.

Dalším významným bodem je místo na křivce prvotní magnetizace, kdy tečna ke křivce prochází počátkem souřadnic. Tento bod definuje maximální permeabilitu.

Bod H_c určuje koercitivní intenzitu magnetického pole a B_r remanentní magnetickou indukci. Tyto body jsou důležité pro určení ztrát magnetováním. Pro jejich přesné měření je nutné snížit kmitočet budícího pole na minimum.

2.4.1 Kvazistatická a dynamická smyčka

Měření indukce na smyčce lze provádět pouze se střídavým budícím polem. Kmitočet je třeba snížit tak, aby bylo možné zanedbat ztráty vířivými proudy. Změřená smyčka se nazývá kvazistatická. V případě, že bude budící kmitočet vyšší, například 50 Hz, budou se v měřeném vzorku uzavírat vířivé proudy, které významně ovlivní ztráty a tedy i tvar hysterezní smyčky. Tato smyčka se nazývá dynamická.

2.4.2 Ztráty v magnetiku

Při magnetování feromagnetika dochází k několika druhům ztrát. Celkové ztráty je možné popsat pomocí vztahu

$$P = P_v + P_h + P_d \quad (\text{W}), \quad (2.5)$$

kde P_v jsou ztráty vířivými proudy, P_h jsou hysterezní ztráty, P_d jsou dodatkové ztráty.

2.4.2.1 Ztráty vířivými proudy

Vířivé proudy se podílí významnou měrou na ztrátách při střídavém magnetování. Ztrátový výkon je přímo úměrný kvadrátu kmitočtu. Ztráty vznikají při elektron-fononové interakci. Přibližný výraz pro velikost ztrátového výkonu lze zapsat vztahem

$$P_v \approx \frac{B^2 f^2 V}{\rho} \quad (\text{W}), \quad (2.6)$$

kde B je indukce magnetického pole, f je frekvence budícího magnetického pole, V je objem feromagnetika, ρ je rezistivita feromagnetika.

Omezení vířivých ztrát lze dosáhnout změnou složení feromagnetika. Přimíchání příměsí (např. Si) zvyšuje rezistivitu feromagnetika a tím snižuje velikost proudů.

2.4.2.2 Ztráty hysterezní

Hysterezní ztráty popisují energetickou náročnost přemagnetování v magnetizačním cyklu. Jsou do značné míry ovlivněny strukturními nedokonalostmi feromagnetika. Dochází tak

k obtížnějšímu přemagnetování v důsledku zhoršeného pohybu Blochových stěn na rozhraní jednotlivých krystalových zrn. Takový materiál má větší hysterezní ztráty popsatelné vztahem

$$P_h \approx S_s f V \quad (\text{W}), \quad (2.7)$$

kde S_s je plocha kvazistatické hysterezní smyčky, f je frekvence budícího magnetického pole, V je objem feromagnetika.

2.4.2.3 Ztráty dodatkové

Dodatkové ztráty jsou způsobeny konečnou rychlostí šíření změn ve feromagnetiku. Jedná se hlavně o pohyb Blochových stěn v materiálu. Tyto ztráty tvoří vždy jen několik procent celkových ztrát a jejich přesné vyčíslení není jednoduché.

Kapitola 3

Přehled typů přístrojů

Historický vývoj metod pro měření magnetických materiálů dal vzniknout značnému množství měřících přístrojů. Některé zanikly s nástupem moderní elektroniky. Jako příklad lze uvést náhradu balistického galvanometru a rotujících cívek měřením na principu Hallova jevu. Jiné metody doznaly díky pokroku v číslicovém zpracování značného vylepšení, například Epsteinův přístroj používaný na katedře teorie obvodů FEL ČVUT v laboratoři LAMM.

3.1 Varianty měřících zařízení

V tabulce 3.1 jsou shrnuty běžně používané metody měření magneticky měkkých až polotvrdých fero-(feri-)magnetických materiálů včetně jejich výhod a omezení. Zahrnuty jsou pouze metody poskytující informace o celém magnetovacím cyklu.

Metoda	Tvar vzorku	Měřicí rozsah	Výhody	Slabiny
Epsteinův rám	tenký pásek	$f : \leq 400$ Hz	standard	dlouhá příprava měření
Dynamická hysterezní smyčka	toroid	$f : 10$ Hz-300 kHz	standard	vyžaduje výrobu vinutí pro každý vzorek
Statická hysterezní smyčka	toroid	$H_{MAX} : 10-20$ kA/m	standard	vyžaduje výrobu vinutí pro každý vzorek
Statická hysterezní smyčka	válec ve jhu	$H_{MAX} : 50-200$ kA/m	standard, rychlá příprava měření	vyžaduje přesný tvar vzorku

Tabulka 3.1: Specifika měřících metod [5]

Kapitola 4

Rešerše původního řešení

Jak mi bylo sděleno, autorem původní konstrukce permeamtru je ing. Michal Mikulec. Přístroj byl zkonstruován v rámci DHČ s podnikem Magneton Kroměříž.

Permeametr je rozdělen na dvě vzájemně propojené skříně. První je měřicí část, která obsahuje jho s otvorem pro vložení měřeného vzorku, a příslušné elektronické obvody pro řízení měřicího cyklu. Druhá skříně obsahuje výpočetní elektroniku, zobrazovací prvky a zdroj.

4.1 Měřicí skříně

Do měřicí části vstupuje napětí ze zobrazovací skříně, které řídí indukci ve vzorku a napájecí napětí ± 24 V. Ven vystupuje napětí z Hallovy sondy. Měřicí část zajišťuje magnetování vzorku podle vstupního napětí.

4.1.1 Mechanika

Spojení magnetického obvodu a vzorku je zajištěno pomocí pólových nástavců, které pomocí šroubového posuvu svírají měřený vzorek z obou stran. Ovládání nástavců je vně skříně.

4.1.2 Měřený vzorek

Vzorek vkládaný do měřicí cívky musí být válcového tvaru s průměrem 10 mm a délkou přibližně 90 mm. Vzorek musí mít horní a spodní podstavu sbroušenou a vyleštěnou tak, aby při vložení do jha nebyla mezi pólovými nástavci a vzorkem vzduchová mezera, která by ovlivňovala měření.

4.1.2.1 Jho

Jádro magnetického obvodu je tvaru podkovy o průřezu 25 cm², sešroubované z hranolů materiálu Armco. Jedná se o ocel bez příměsí s vysokou sytnou indukcí. Jádro je po smontování vyžíhané z důvodu minimalizace pnutí v materiálu a dosažení vyššího sycení. Celková délka magnetického obvodu včetně vloženého vzorku je 1 m.

4.1.2.2 Budící cívky

Magnetování vzorku se provádí pomocí dvou cívek navinutých na pólových nástavcích. Každá z nich má 600 závitů navinutých Cu vodičem o průměru 1 mm. Umístění cívek je záměrně symetrické, aby byl minimalizován rozptyl magnetického pole. Na vzorek by tak mělo působit téměř homogenní magnetické pole.

Indukčnost	94,4 mH
Kapacita	25,25 μ F
Odpor	4,98 Ω

Tabulka 4.1: Elektrické vlastnosti budících cívek

4.1.2.3 Měřicí cívka

Držák vzorku obsahuje měřicí cívku, která má 10000 závitů. Množství závitů je zásadní pro vytvoření dostatečně vysokého indukovaného napětí. Nevýhodou vysokého počtu závitů je nízký vlastní rezonanční kmitočet cívky. Proto není možné měřit na vyšších kmitočtech než jednotky Hz. Při vyšších kmitočtech by bylo měření neprůkazné. Vyvedené vodiče cívky jsou vzájemně svinuté, aby nedocházelo k indukování rušivých signálů mimo tělo cívky.

Indukčnost bez vloženého vzorku	3,2 mH
Kapacita	1251 μ F
Odpor	59,16 Ω

Tabulka 4.2: Elektrické vlastnosti měřicí cívky

4.1.2.4 Hallova sonda

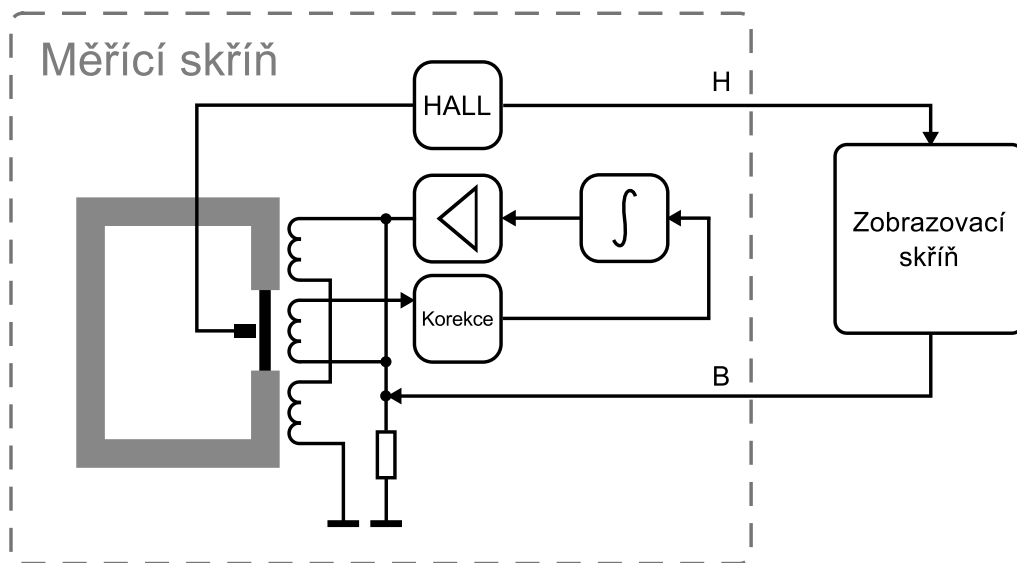
V držáku vzorku je umístěna Hallova sonda, která se těsně dotýká povrchu vzorku. Sonda snímá intenzitu magnetického pole na povrchu vzorku. Vyvedené vodiče od sondy jsou záměrně smotané, vždy v páru budících vodičů a měřících tak, aby byly omezené okolní rušivé vlivy.

4.1.3 Řídící elektronika

Řízení měřícího cyklu se provádí pomocí napětí ze zobrazovací skříně, viz B.1. To je přivedeno na měřicí cívku jako stejnosměrný offset, který je elektronikou v měřící části automaticky nulován. Korekční napětí z výstupu výkonového stupně je přiváděno zpět do měřicí cívky, kde nuluje přivedený offset a zároveň je přivedeno i na budící cívky. Průběh intenzity magnetického pole budících cívek je tak záměrně nelineární. Zapojení této komplexní zpětnovazební sítě, viz 4.1, zajišťuje lineární průběh indukce tak, jak je vynucován ze zobrazovací skříně vstupním napětím.

4.1.3.1 Výstupní zesilovač

Výstupní zesilovač pro budící cívky je zkombinován s OZ, který má funkci neinvertujícího integrátoru. Vstupem je napětí z měřicí cívky a korekčních obvodů. Výstupní napětí je přímo přivedeno na budící cívky a přes spínač měření také na měřicí cívku. Zesilovač obsahuje OZ se svitkovým kondenzátorem C81 ve zpětné vazbě a jeden pár výkonových tranzistorů pro posílení proudového výstupu. Jinak je konstrukce klasická jako u běžných zesilovačů ve třídě B.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení původního permeamtru

4.1.3.2 Korekční obvod

Napětí z měřicí cívky je zavedeno do korekčního obvodu, který mění rychlost průchodu měřicího cyklu, viz B.1. Jedná se o okrajové oblasti hysterezní smyčky, ve kterých roste intenzita pole do maxima nebo minima. Tyto oblasti se vyznačují nízkými velikostmi změny indukce a je žádoucí v nich zrychlit měřicí cyklus. Detekce okrajových oblastí probíhá pomocí vzorkovacího obvodu řízeného oscilátorem z tranzistorů Q26 a Q27. Napětí z cívky je přivedeno na diody D22 a D23, které signál napěťově omezí. Dále je filtrován pomocí dolní propusti R293, C92 a R294. Soustava tranzistorů se společným emitorem Q30, Q31 a Q36 zesílí střídavou složku a tu přivede na diferenční stupeň IC54 a nabije kondenzátor C77. Zde dojde k porovnání velikosti zesílené změny napětí na měřicí cívkě s velikostí změny v následujícím taktu oscilátoru. Trojitý kaskádní zesilovač je pravidelně nulován pomocí tranzistorů Q29 a Q37. Detekovaný rozdíl ve strmosti nárůstu napětí je z IC54 přiveden přes soustavu tranzistorů Q34 a Q23 na druhý diferenční stupeň složený z Q32 a Q33, který budí výkonový stupeň složený z Q24 a Q25. Jeho výstupní napětí je přivedeno do OZ výstupního zesilovače budících cívek.

4.2 Zobrazovací část

Zobrazovací část obsahuje zdroj, pět vzájemně propojených desek plošných spojů plnicích rozdílné funkce a dále dvě zobrazovací jednotky s digitrony. Vstupem je síťové napájecí napětí a napětí z Hallovy sondy. Výstupy jsou napětí ± 24 V pro napájení měřící části a napětí pro řízení indukce ve vzorku. Na předním panelu je vyvedeno napětí odpovídající indukci a napětí odpovídající intenzitě magnetického pole.

4.2.1 Zdroj

Zdroj pro celý permeametr se nachází ve skříni zobrazovací části. Jedná se o jeden transformátor s několika sekundárními vinutími, pojistkou a síťovým vypínačem. Jednotlivá vinutí jsou rozdělena pro symetrické napájení výkonové části permeamtru, digitální části, která pracuje na napětí 5 V, a anodové napětí pro digitronové zobrazovače. Napětí z transformátoru je vyhlazeno kondenzátory a pro digitální obvody je ještě stabilizováno stabilizátorem typu 7805. Zapojení viz B.3.

4.2.2 Měřící obvody Hallovy sondy

Hallová sonda je napájena střídavým proudem obdelníkového průběhu s frekvencí přibližně 600 Hz. To zajišťuje oscilátor a tvarovač na desce E, viz B.8. Střídavý proud je zvolen z důvodu minimalizace ovlivnění snímací cívky statickým polem kolem přírodních vodičů k Hallově sondě. Změřené napětí na napěťovém výstupu sondy je alternující a je tedy potřeba jej filtrovat. Nejprve je provedeno odečtení napětí na svorkách sondy. Tím se odstraní napěťový offset a souhlasné rušivé signály na obou vodičích. Od výsledku je ještě odečteno napětí vytvořené buzením sondy. Signál je dále usměrněn, vyhlazen dolní propustí a zesílen. Podpůrné obvody Hallovy sondy jsou umístěné na desce D, viz B.7.

4.2.3 Řízení permeamtru

Řízení měřícího cyklu permeamtru je realizováno na desce A, viz B.4. Základním prvkem je napěťový sledovač postavený kolem IC47. Výstupní napětí sledovače je použito pro vytvoření stejnosměrného předpětí na měřící cívce pomocí obvodu IC46. Obvod IC45 je zapojen jako komparátor s kladnou zpětnou vazbou. V zapojení pracuje jako oscilátor, který definuje periodu měřícího cyklu. Jeho výstup je zaveden do IC46 a podílí se tak

na úrovni stejnosměrného předpětí na měřící cívce. Výstup IC45 je použit jako signál polarity pro DAC na desce B. Řízení celého měřícího cyklu se provádí pouze změnou stejnosměrného předpětí na měřící cívce. Kmitočet změn předpětí definuje velikost intenzity magnetického pole v měřeném vzorku. Amplituda předpětí definuje indukci ve vzorku.

A18-A19-C10-D23	Vstupní napětí odpovídající intenzitě magnetického pole (H).
A36-A37	Výstupní napětí pro měřící cívku.
A14-A15-B11	Výstupní napětí definující polaritu pro DAC na desce B.
A57-B22	Výstupní obdélníkové napětí pro DAC na desce B.

Tabulka 4.3: Označení vstupů a výstupů desky A ve schématu

4.2.4 DAC pro výstup a zobrazení B

Deska B, viz B.5, je určena pro vytvoření napětí odpovídající magnetické indukci a jeho zobrazení. Výstupní obdélníkový signál z VCO desky A B.4 je přiveden do vstupu obvodu IC37. Zde je kmitočet signálu vydělen dvěma a tvarován. Výstup je dále zaveden do dvou kaskád binárních čtyřbitových čítačů. První kaskáda s obvody IC42 až IC44 čítá nebo odčítá pulzy podle výsledků dekódovací logiky obvodu IC38. Čítání nahoru nebo dolů je řízeno z desky A obvodem IC45. Výstupy první kaskády spínají tranzistory zapojené v rezistorovém zpětnovazebním děliči obvodu IC36. Výstupní napětí IC36 je výsledkem součtu napětí na děličích a offsetu neinvertujícího vstupu. Cílem je aby výstupní napětí bylo opět symetrické podle nuly. Druhá kaskáda čítačů IC39 až IC41 je určena k detekci nulové hodnoty zobrazené indukce. Tato kaskáda provádí dělení počtu pulzů při čítání nahoru jednou polovinou a svým výstupem nuluje vnitřní stavy čítačů první kaskády tak aby výstupní napětí celého DAC bylo symetrické. Řídící signál pro nulování je zaveden do desky předního panelu s dalšími signály pro čítání a směr čítání. Deska předního panelu se skládá z další kaskády čítačů a zobrazovacích prvků - digitronů. Zobrazení a vytvoření napětí, které odpovídá magnetické indukci vzorku je takto vytvořeno čistě virtuálně a z principu měření by mělo odpovídat skutečnosti. Jaká je odchylka skutečnosti od zobrazených hodnot na digitronech jsem neměřil.

4.2.5 ADC pro zobrazení H

Deska C, viz B.6, je ADC pro zobrazení hodnoty intenzity magnetického pole. Jedná se o zpětnovazební komparační AD převodník složený ze tří čtyřbitových čítačů zapojených do kaskády a dvou komparátorů. Vstupní signál je veden do komparátoru IC11. Ten detekuje polaritu vstupního signálu. Výstupní napětí komparátoru je použito k indikaci záporné hodnoty pomocí LED2 a zároveň k vytvoření absolutní hodnoty ze vstupního napětí obvodem IC12. K výstupu IC12 je přičteno napětí řízeného zdroje z IC17. Součet je vynásoben deseti a přiveden do dvojice komparátorů, které toto napětí porovnají s hodnotami -100 mV a 100 mV. V případě, že je vstupní napětí překročí jednu z úrovní tak je na výstupu komparátoru vygenerována řídicí úroveň pro logiku IC25, která přivede signál z oscilátoru IC16 na vstup kaskády čítačů IC26 až IC28. Podle úrovně, kterou vstupní napětí překročilo, je čítáno nahoru nebo dolů. Podle výstupní hodnoty čítačů jsou spínané rezistory zpětnovazební sítě řízeného zdroje IC17 a definují jeho výstupní napětí. Celá deska C tak pracuje jako napěťový sledovač s digitálním výstupem a hysterezí 20 mV. Výstupní dvanáctibitová hodnota je přivedena na přední panel s dekodérem pro digitrony. Jediným vstupem celé desky je tedy signál A18-A19-C10-D23, který vede napětí odpovídající intenzitě magnetického pole.

4.3 Nevýhody

1. Zpětnovazební řídicí smyčka je uzavřená a jediným ovládacím vstupem je amplituda napěťového offsetu na budící cívce.
2. Napětí odpovídající indukci je generováno v měřící části a nemusí odpovídat skutečnosti.
3. Celá konstrukce je těžko modifikovatelná. V případě požadavku na citlivější měření nebo zobrazení Barkhausenova šumu není úprava možná a je třeba celé zařízení zkonstruovat od základu jinak.

Kapitola 5

Autorské řešení

V následující kapitole jsem navrhl konstrukci permeamtru s ohledem na známé požadavky. Možností jak jej realizovat je několik. Každá má svá úskalí, výhody a nevýhody.

5.1 Varianty řešení

Historický vývoj názorně ukazuje přesun měřících přístrojů od analogových řešení k digitálním. Přesto nemusí být digitální řešení tím nejvýhodnějším.

5.1.1 Analogový měřicí přístroj

Plně analogová konstrukce je použita v permeamtru ing. Mikulce. K zobrazení používá analogově digitální převod. Budící signál pro cívky je vytvářen integrací napětí na měřicí cívce a diferencí s trojúhelníkovým signálem, který je v oblastech s maximální intenzitou pole deformován z důvodu zrychlení měření.

Tato varianta je principiálně velmi jednoduchá, ale konstrukčně složitější. Hlavní nevýhoda je v nemožnosti připojit permeametr k PC a využít tak možnosti řízení celého měřicího cyklu.

Z analogového řešení je možné převzít dokonale zpracované měření intenzity pole pomocí Hallovy sondy a konstrukci výkonového stupně pro buzení cívek.

5.1.2 Softwarově definovaný měřicí přístroj

Protipólem analogovému řešení je plně digitální konstrukce. Modifikovaný trojúhelníkový signál je generován přímou digitální syntézou v mikropočítači a pomocí digitálně analogového převodníku a výkonového zesilovače je přiveden na budící cívky.

Napětí z měřicí cívky je v ideálním případě přímo změřeno citlivým analogově digitálním převodníkem a integrace je prováděna softwarově uvnitř řídicího mikropočítače. Napětí z hallovy sondy je měřeno stejným způsobem.

Nevýhodou kompletně digitálního měření je problematická realizace AD převodníku na výstupu měřicí cívky. Další nepřesnosti mohou vznikat při vzorkování signálu a softwarové integraci.

Výhodné je řešení generátoru pomocí přímé syntézy, které se v mikropočítači realizuje velmi jednoduše.

5.1.3 Analogově digitální měřicí přístroj

Kombinací výše zmíněných řešení je analogově digitální měřicí přístroj, který nese prvky obou přístupů. Profesionální permeametry jsou nejčastěji řešeny právě tímto způsobem.

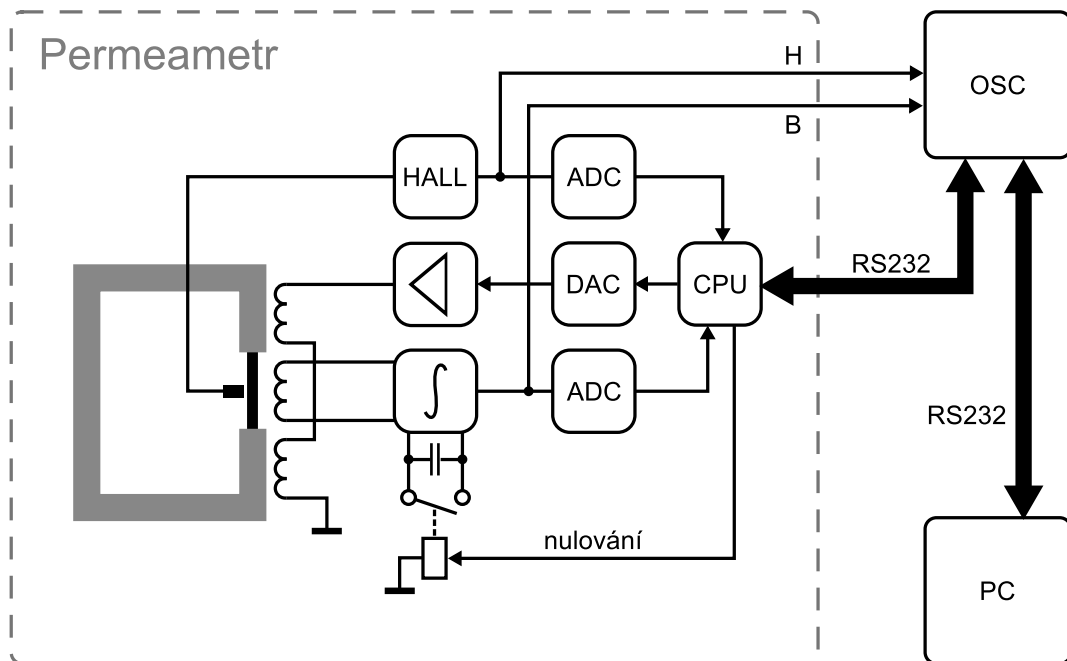
5.2 Zvolené řešení

V návrhu modernizace permeamtru jsem zvolil kombinaci analogových měřicích a výkonových prvků s digitálním řízením pomocí mikropočítače. Obrázek 5.1 popisuje blokové zapojení permeamtru.

5.2.1 Generátor signálu

Trojúhelníkový signál pro budící cívky je nejvhodnější generovat pomocí přímé digitální syntézy v mikropočítači. Principiálně se jedná o lineárně lomenou funkci popsanou vztahem:

$$y(n) = \begin{cases} y(n-1) + k & 0 \leq n < T/2 \\ y(n-1) - k & T/2 \leq n < T \end{cases} \quad (5.1)$$



Obrázek 5.1: Schéma permeamtru

kde $y(n - 1)$ je hodnota výstupní funkce v předchozím kroku, n je index kroku, který nabývá hodnot od 0 do T , k je proměnná definující velikost změny v kroku.

Tvar průběhu signálu je možné v rámci periody ovlivňovat za účelem zrychlení průchodu maximem a minimem funkce pomocí proměnné k . Pro generování demagnetizačních průběhů je vhodné změnit velikost periody a kroku. Výstupní hodnota generátoru představuje velikost napětí na výstupu digitálně analogového převodníku. Toto napětí je třeba symetrizovat vzhledem k nesymetrickému napájení mikropočítače, tak aby maxima i minima měla stejnou absolutní velikost. Symetrické napětí není třeba nějak filtrovat a je možné jej po zesílení přivést do výstupního zesilovače.

5.2.2 Výkonový stupeň

Jako výkonový stupeň je třeba použít zesilovač napětí s dostatečně lineární charakteristikou a symetrickým vstupem i výstupem. Zesilovač musí být schopen dodat do zátěže dostatečně vysoký proud, vzhledem k počtu závitů na budících cívkách a požadované

proudové hustotě potažmo intenzitě pole v cívce. Dále je nutné počítat s enormně vysokým množstvím energie indukovaným v jádře a konstrukci zesilovače zvolit tak, aby v případě chyby generátoru nedošlo k přetížení výkonového stupně zpětně indukovaným napětím. Této situaci se musí aktivně bránit vhodným průběhem budících signálů.

Použití běžného NF zesilovače pro audio aplikace je v podstatě nevhodné z důvodu nízkého odporu vinutí budících cívek. Řešením je použití stávající konstrukce výkonového stupně v původním permeamtru.

5.2.3 Analogový integrátor

Analogový integrátor je srdcem a kritickou částí celého permeamtru. Požadavky na přesnost integrátoru potažmo operačního zesilovače, který integraci zajišťuje, jsou extrémně vysoké:

- Nulový vstupní napěťový offset,
- nulový vstupní proud,
- minimální teplotní drift,
- maximální potlačení napájecího napětí,
- rozsah měřených kmitočtů od 0 Hz do 100 Hz.

Tyto požadavky vyplývají z charakteru měřeného signálu. Měřicí cívku je nutné zatížit co nejméně, proto je nutné, aby měl integrátor rozumně vysoký vstupní odpor. Indukované napětí na cívce je v řádu jednotek až desítek mikrovoltů, proto je třeba nulový vstupní offset. Požadavek na teplotní drift je částečně omezen stálostí vnitřního prostředí v permeamtru. Podrobný popis lze najít například v této publikaci [8]. Vhodným obvodem pro stavbu integrátoru je například obvod LTC1050. Jedná se o bipolární automaticky nulovaný operační zesilovač s integrovanými vzorkovacími kondenzátory. Tento typ OZ se vyznačuje velmi nízkým napěťovým offsetem na vstupech a konstantní úrovní šumu na frekvencích nižších než je kmitočet interního oscilátoru. Tabulka 5.1 shrnuje základní parametry zvoleného OZ v pásmu 0 Hz až 10 Hz.

Přesto bude před každým měřením nutné nechat přístroj několik desítek minut zahřát na pracovní teplotu. Základní zapojení měřicí cívky a integrátoru odpovídá schématu 5.2.

V zapojení je znázorněna měřicí cívka s jejím parazitním odporem R_i . Parazitní kapacita je virtuálně zkratovaná a je možné ji zanedbat. Velikosti odporu (R_1+R_i) a R_2

Napěťový vstupní offset	0,5 μV
Drift vstupního offsetu	0,01 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Šum	1,6 $\mu\text{V}_{\text{P-P}}$
CMRR	120 dB
PSRR	125 dB

Tabulka 5.1: Vlastnosti OZ LTC1050

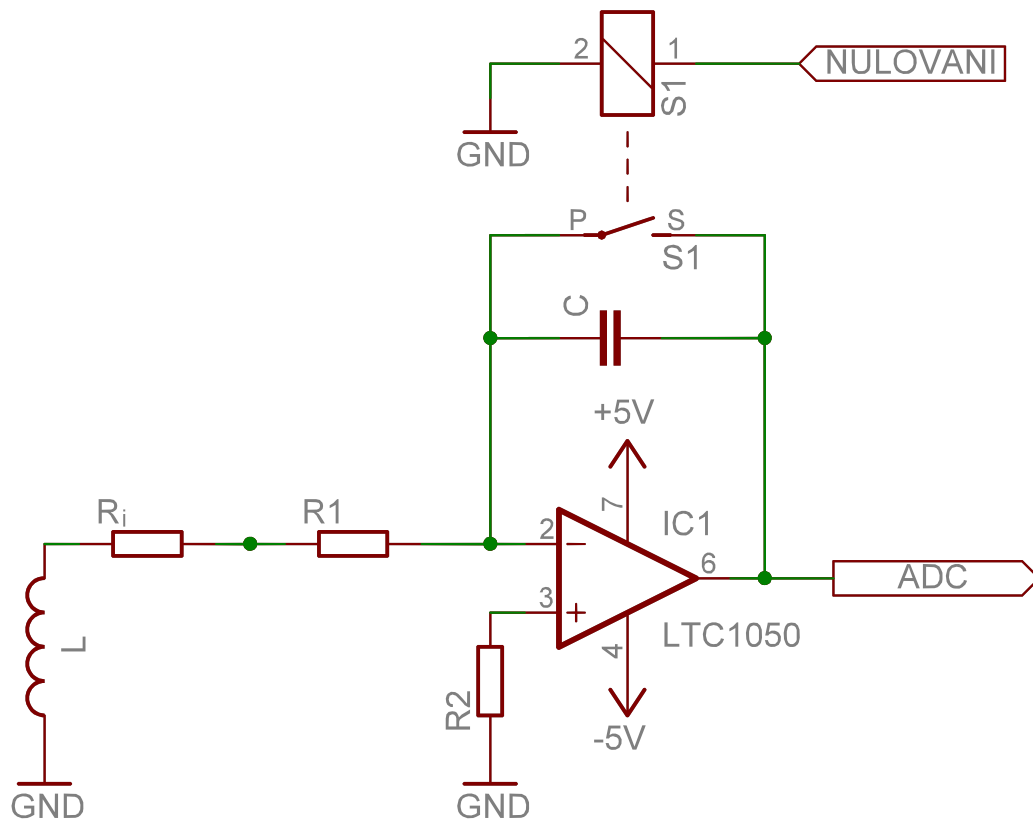
musí být shodné, aby eliminovaly vstupní proudy OZ. Zároveň tyto rezistory společně s kondenzátorem C definují integrační konstantu. Kondenzátor C je zásadní částí celého integrátoru. Od jeho dielektrika je vyžadován extrémně nízký svodový proud a maximálně lineární závislost kapacity na napětí a teplotě. Jako vhodný materiál pro dielektrikum je polypropylen nebo teflon. Kapacitu lze spočítat ze vztahu pro výstupní napětí integrátoru a známého napájecího napětí $\pm 5\text{ V}$.

$$U_{OUT} = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^T U_{IN} dt \quad (\text{V}), \quad (5.2)$$

kde U_{IN} je vstupní napětí na rezistoru R_1 vůči zemi a U_{OUT} je výstupní napětí integrátoru. Při použití dostatečně velikého rezistoru například hodnoty $10\text{ k}\Omega$ stačí kondenzátor o kapacitě 10 nF . Při konstantním vstupním napětí o velikosti $10\ \mu\text{V}$ a periodě 30 s bude výstupní napětí mít amplitudu 3 V . Konečnou hodnotu rezistoru bude nutné ještě korigovat podle požadované amplitudy výstupního napětí. Paralelně ke kondenzátoru je připojen spínač S1, který je na DPS vhodné realizovat pomocí kontaktu jazýčkového relé. K nulování kondenzátoru není možné použít jeden pól řízený tranzistor typu JFET z důvodu symetrické polarizace nabitého napětí. Kombinace více MOSFET tranzistorů není možné použít, protože jejich svodový proud je řádově vyšší než obě zmíněné varianty. Nulování kondenzátoru je nutné pro zahájení integrace při měření křivky prvotní magnetizace a při nulování driftu.

5.2.4 Napájecí zdroj

Požadavky na napájecí zdroj nejsou nijak extrémní. Zdroj musí být symetrický $\pm 5\text{ V}$ a dostatečně proudově dimenzovaný. Důležité je potlačení síťového napájecího napětí, které proniká skrz vyhlazení a stabilizátory. K tomu je možné použít obvod známý jako



Obrázek 5.2: Schéma integrátoru

kapacitní násobič. Jeho zapojení je patrné z obrázku 5.3.

V zapojení je použit proudový zesilovací činitel k násobení kapacity kondenzátoru C_1 podle vztahu 5.3.

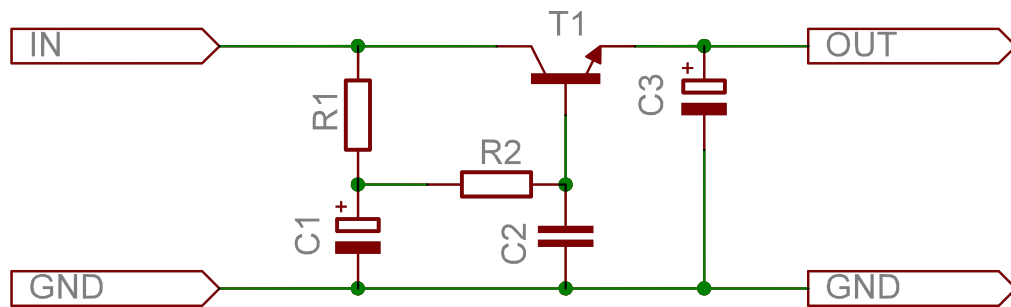
$$C = \beta \cdot C_1 \quad (\text{F}), \quad (5.3)$$

kde β je proudový zesilovací činitel tranzistoru T1. Celé zapojení zdroje vypadá pak následovně B.9.

5.2.5 AD a DA převodníky

V konstrukci permeametry jsou použity dva AD převodníky a jeden DAC. Jejich primární určení je detekce chybových stavů, měření symetrie hysterezní smyčky a zpětnovazební nulování driftu integrátoru.

Na měřený vzorek působí nejen pole budících cívek, ale také magnetické pole země



Obrázek 5.3: Schéma zdroje

a obecně okolí, ve kterém je permeametr umístěn. Vzorek je díky tomu nesymetricky magnetován a to způsobuje nesymetrický průběh indukovaného napětí v měřící cívce. K tomu se přidává vlastní offset na vstupu OZ v integrátoru a výsledkem je, že se hysterezní smyčka každou periodu o krok posune směrem na ose indukce. Při správném řízení permeamtru jsou tyto situace detekovány ovládacím SW a následně je upravena křivka generátoru tak, aby byl průběh hysterezní smyčky symetrický. K této činnosti není třeba příliš vysoký dynamický rozsah ADC pro měření indukce, z praktických pokusů vyplynulo, že rozlišení 10 bitů dostačuje.

Měření napětí na Hallově sondě je nutné v situaci, kdy je požadováno měření křivky počáteční magnetizace. Skokovým vypnutím budícího napětí v cívkách by došlo k proudovému přetížení výstupního zesilovače. Napětí na budících cívkách je nutné snižovat postupně a detekovat, kdy pole zaniklo. Stejná situace nastává při přechodu z demagnetizačních průběhů do nuly.

Jediný použitý DA převodník může být na principu pulzně šířkové modulace při použití dolní propusti s dostatečně vysokou strmostí útlumu. Budící cívky mají dostatečně vysokou indukčnost, aby omezily případné napěťové špičky způsobené nedokonalou filtrací generovaného signálu. Dostačující rozlišení PWM signálu je 10 bitů.

5.2.6 Měření

Spuštění měřicí sekvence iniciuje řídicí PC nebo pomaloběžný zapisovač pomocí sériové linky. Směrem ze zapisovače(PC) do permeamtru proudí pouze jednoduché ASCII znaky, které jsou v zapisovači interpretovány jako příkazy pro vybrané funkce. Základní příkazy

pro ovládání permeamtru jsou popsané v tabulce 5.2.

Písmeno	Příkaz
m	Spuštění měření
s	Ukončení měření
d	Spuštění demagnetizace
p	Spuštění měření křivky prvotní magnetizace

Tabulka 5.2: Popis základní příkazové sady pro ovládání permeamtru

Permeametr odpovídá vždy znakem **a**, pro odpověď přijatého příkazu a následně **d**, kdy je příkaz dokončen nebo může být spuštěn záznam dat. Mezi příjmem znaků **a** a **d** může být jistá časová prodleva, odpovídající době potřebné k realizaci přípravy obvodů permeamtru do pracovního stavu.

5.2.6.1 Měření hysterezní smyčky

Princip měření hysterezní smyčky je možné popsat v několika krocích:

1. Vybití kondenzátoru v integrátoru.
2. Spuštění generátoru trojúhelníkového signálu.
3. Při každém průchodu generovaného signálu nulou je nutné změřit velikost napětí odpovídajícího indukci a porovnat jej s hodnotou naměřenou při zpětném průchodu. Podle výsledku je vhodné korigovat tvar generovaného signálu, tak aby byla výsledná hysterezní smyčka symetrická podle osy indukce.
4. Při dostatečně vysoké intenzitě pole je možné generovaný signál zrychlit nebo zpomalit podle růstu nebo klesání hodnoty indukce.
5. Po několika periodách signálu (v praxi ověřeno že stačí 3) permeametr pošle informaci zapisovači(PC), že je možné začít měřit.

5.2.6.2 Měření křivky prvotní magnetizace

Postup měření křivky prvotní magnetizace je následující:

1. V rámci demagnetizace je vhodné mít trvale zkratovaný kondenzátor integrátoru.
2. Spuštění demagnetizace.
3. Rozpojení nulovacího relé pro kondenzátor integrátoru.
4. Odeslání informace o zahájení měření řídicímu zapisovači(PC).
5. Spuštění trojúhelníkového signálu.
6. Zastavení generovaného průběhu v maximu funkce.
7. Odeslání informace o ukončení měření řídicímu zapisovači(PC).
8. Postupné snížení intenzity budícího pole na nulu.

Kapitola 6

Zpracování dat a výsledky měření

Návrh permeamtru počítá s připojením externího souřadnicového zapisovače pro vykreslení hysterezní smyčky pomocí analogových napětí. Místo souřadnicového zapisovače se na katedře elektrotechnologie používá pomaloběžný zapisovač připojený k PC. Ten bude ve finální podobě k permeamtru připojený pomocí sběrnice RS232 a bude měřit napětí z integrátoru a Hallovy sondy. Digitalizované napětí je ze zapisovače odesíláno do PC a zde jej zpracovává připravený SW.

6.1 Zapisovač

Pro záznam napětí na svorkách původního permeamtru byl vytvořen pomaloběžný dvoukanálový zapisovač. Jeho hlavní předností je galvanické oddělení měřících sond od společného potenciálu. Zapisovač je připojen pomocí sériové linky a rozhraní USB do PC. Řízení zapisovače je provedeno pomocí ovládacího SW v PC.

6.1.1 Parametry zapisovače

Změřené parametry jsou popsány v tabulce 6.1.

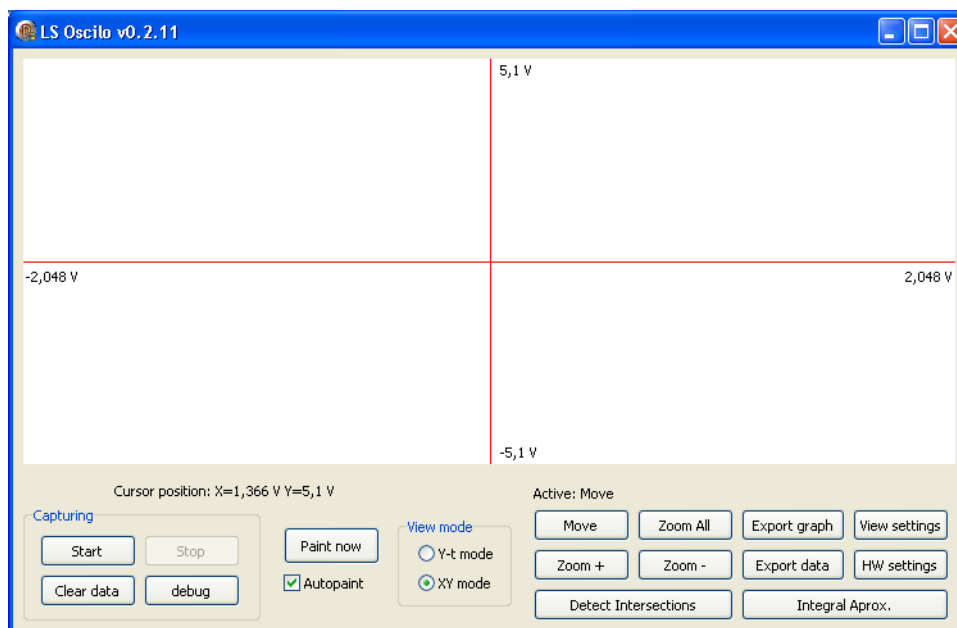
Počet kanálů	2
Maximální vzorkovací frekvence	1 kHz
Maximální vstupní napětí	4,75 V
Chyba měření	± 5 mV

Tabulka 6.1: Parametry zapisovače

6.2 Ovládací software

Ovládací software slouží k zobrazení naměřených dat, jejich zpracování a exportu do různých formátů. Program je vytvořen v prostředí Delphi. Je tak plně kompatibilní s operačními systémy MS Windows XP, Vista, 7. Popis ovládacích prvků GUI je rozepsán níže.

Ovládací prvky programu jsou systematicky rozděleny podle funkcí do několika bloků. V levém dolním rohu je ovládání záznamu. Uprostřed se nachází ovládání zobrazení a vpravo dole jsou umístěny funkční tlačítka pro práci s obrazovkou a tlačítka pro nastavení možností programu.



Obrázek 6.1: Grafické uživatelské rozhraní ovládacího SW

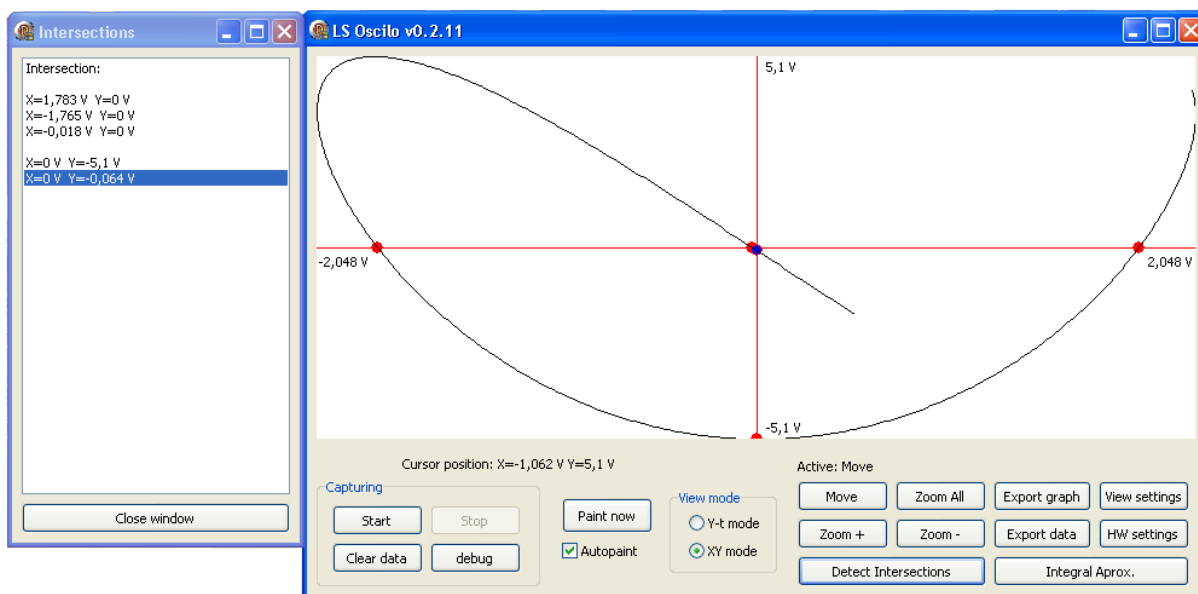
Start	aktivuje příjem hodnot ze zapisovače
Stop	ukončí příjem hodnot ze zapisovače
Clear data	maže při stisku přijatá data ze zapisovače a zároveň vymaže vykreslený průběh z obrazovky
Debug	zobrazí veškerá přijatá data ze zapisovače do samostatného okna
Paint now	jednou překreslí obrazovku podle přijatých dat
Autopaint	checkpoint spouští automatické překreslování obrazovky podle nastavené frekvence v menu View settings viz 6.2.2

Tabulka 6.2: Popis tlačítek a funkčních prvků pro příjem a zobrazení dat v hlavním okně programu LS Oscilo

View mode	přepínač puntíků slouží k volbě zobrazovacího režimu. Volba „XY Mode“ přepne obrazovku do módu, ve kterém je jeden zvolený vstup použit pro X souřadnice a druhý pro Y souřadnice. Volba „Y-t Mode“ přepne obrazovku do módu, ve kterém jsou všechny vstupy zobrazovány v závislosti na čase.
Move	Aktivuje funkci posouvání grafu na obrazovce pomocí kurzoru myši.
Zoom All	Obnoví zobrazení obrazovky zpět na maximální a minimální hranice obou os a obraz zároveň vycentruje.
Zoom +	Aktivuje funkci zvětšení pomocí kurzoru myši. Kliknutím a tažením se za kurzorem zobrazí obdélník zvětšované oblasti.
Zoom -	Při kliknutí jednorázově zmenší obraz.
Detect Intersections	Slouží k nalezení průsečíků grafu s osami. Toto tlačítko je podrobně popsáno v 6.2.1.
Export graph	Slouží k uložení aktuálního obrazce na obrazovce včetně os a popisek. Ukládá se do souboru formátu BMP do zvoleného umístění. Úspěšné uložení je oznámeno v okně s plnou adresou uloženého souboru.
Export data	Slouží k uložení přijatých a podle nastavených mezí přepočítaných dat do souboru formátu CSV do zvoleného umístění. Úspěšné uložení je oznámeno v okně s plnou adresou uloženého souboru.
View settings	Slouží ke vstupu do podrobnějšího menu nastavení zobrazení. Tato nabídka je podrobně popsána v 6.2.2.
HW settings	Slouží ke vstupu do podrobnějšího menu nastavení příjmu dat. Tato nabídka je podrobně popsána v 6.2.3.
Integral Aprox.	Slouží ke spuštění programu pro externí výpočty. V této práci slouží ke spuštění programu pro výpočet Plochy hysterezní smyčky a měrných hysterezních ztrát. Do něj se ručně vkládají hodnoty odečtené pomocí nástrojů programu LS Oscilo.

Tabulka 6.3: Popis tlačítek pro práci se získanými daty v hlavním okně programu LS Oscilo

6.2.1 Funkce Detect Intersections



Obrázek 6.2: Funkce Detect Intersections

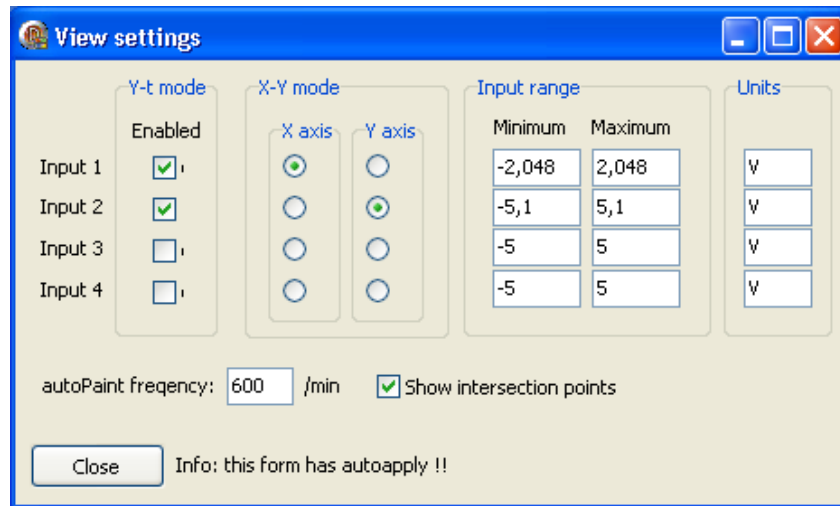
Funkce Detect Intersection slouží k nalezení průsečíků zaznamenaného grafu s osami.

Po stisku tlačítka Detect Intersections se graf v místech průsečíků zvýrazní červenými body a zároveň se v novém okně zobrazí tabulka se souřadnicemi jednotlivých bodů.

Přiblížením kurzoru myši k libovolnému zvýrazněnému průsečíku na obrazovce dojde k jeho označení modrou barvou. Zároveň dojde ke zvýraznění tohoto bodu v seznamu průsečíků. Tato funkce funguje i obráceně. Kliknutím na jeden z bodů na seznamu průsečíku dojde ke zvýraznění daného průsečíku na obrazovce.

6.2.2 Nabídka View Settings

Nabídka View Setting slouží k nastavení zobrazení, jednotek, definici vstupů a maximálních hodnot na jednotlivých osách.



Obrázek 6.3: Nabídka View Settings

Tabulka View Settings je rozdělena následovně. Každý řádek je přiřazen jednomu ze vstupů. Každý sloupec řídí vlastnosti vstupů.

Blok Y-t mode slouží k povolení vykreslování dat přijatých z daného vstupu.

Blok X-Y Mode slouží k přiřazení vstupů X a Y souřadnic.

Blok Input Range definuje, jaká hodnota odpovídá maximální respektive minimální přijaté hodnotě z ADC zapisovače.

Blok Units definuje, jaká jednotka se zobrazí na obrazovce v grafu a také v souboru pro exportovaná data.

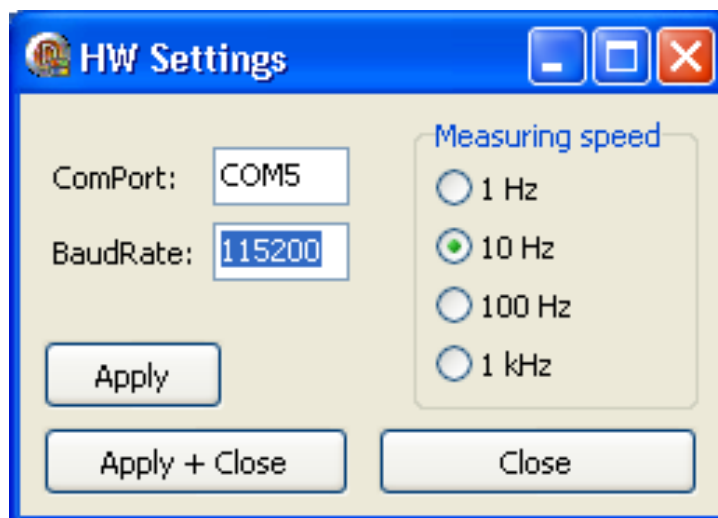
Hodnota AutoPaint Frequency určuje, jak často se bude překreslovat obrazovka s grafem probíhající funkce. Číslo v kolonce udává počet překreslení za minutu.

Kolonka Show Intersection Points povoluje zvýraznění průsečíků grafu s osami. Jedná se pouze o grafickou úpravu funkce hledání průsečíků, na výsledek hledání nemá vliv.

Změny prováděné v nastavení zobrazení se okamžitě promítají na obrazovku.

6.2.3 Nabídka HW Settings

Nabídka HW Setting slouží k nastavení portu, rychlosti a vzorkovací frekvence zapisovače.



Obrázek 6.4: Nabídka HW Settings

V kolonce ComPort se vkládá zvolený port jako text ve tvaru COMx, kde x znamená číslo portu.

V další kolonce BaudRate se vkládá celočíselně přenosová rychlost zvoleného portu.

Blok Measuring Speed slouží ke zvolení frekvence vzorkování.

Následující tři tlačítka mají lehce odlišnou funkci.

Apply uloží nastavení a zároveň zkusí připojení na port sériové linky. V případě nepodařeného pokusu program upozorní, že se mu nepodařilo připojit na zvolený port.

Apply + Close pracuje stejně jako předešlé tlačítko s rozdílem, že navíc nabídku HW Settings zavře.

Close pouze zavírá nabídku HW Settings a provedené změny se neukládají.

6.3 Zpracování dat

Zpracování naměřených dat je buď možné jednoduše v přiloženém SW nebo v libovolném tabulkovém procesoru typu MS Excel přímo z vyexportovaných dat ve formátu CSV. Příklad výstupu exportovaných dat při měření magneticky polotvrdé oceli A.1 a uložené obrazovky A.2. Příklad změřené křivky prvotní magnetizace pro stejný vzorek A.3.

6.4 Odhad a odstraňování systémových chyb měření

Během měření mohou a velmi pravděpodobně budou vznikat odchylky v jednotlivých měřeních způsobené systémovými chybami permeamtru. V této kapitole bych chtěl rozbrat jednotlivé často se vyskytující odchylky a způsoby jejich oprav či korekcí.

6.4.1 Teplotní drift

Nejvýznamnější chybou, při měření velmi nízkých napětí integrátorem, je teplotní drift součástek. Při zapnutí měřicího přístroje dochází k nerovnoměrnému zahřívání všech součástek a obvodové parametry se tak mění s rostoucí teplotou. Rostoucí teplota ovlivňuje prakticky všechny vlastnosti celého permeamtru. Z nejběžnějších mohu jmenovat odpor rezistorů s metalizovanou vrstvou a kapacitu kondenzátorů s keramickým dielektrikem. Odstranění této chyby je značně obtížné a vyžadovalo by zakrytování citlivých součástek do teplotně stabilizované komory. Jednodušším řešením je ponechání permeamtru v pracovním režimu několik hodin. Teploty součástek se časem ustálí.

6.4.2 Vliv vnějších statických magnetických polí

Vliv magnetického pole země je asi o dva až tři řády slabší než maximální hodnota pole v měřeném vzorku. Při správném nasměrování může vnější pole způsobovat nesy-metrické sycení vzorku a tím způsobovat nasčítávání offsetu na integrátoru po každé periodě měřicího cyklu. Tento posun je možné kompenzovat opačným offsetem signálu do budících cívek.

6.4.3 Vliv vnějších střídavých magnetických polí

Nejvýznamnější vliv vnějšího střídavého magnetického je od elektroinstalace v laboratoři a samotného zdroje v permeamtru. Tento efekt je principiálně odstraněn velmi dlouhou periodou měřicího cyklu. Odchylky způsobené sítí se zprůměrují a na výsledek nemají vliv. Zajímavé by bylo změřit vliv vysokofrekvenčních rádiových zdrojů, například mobilního telefonu, na měření. Odstranění tohoto vlivu lze vhodnou konstrukcí skříně permeamtru, která elektromagneticky odstíní měřící elektroniku.

6.4.4 Vliv nedokonalostí vzorku

Při špatném sbroušení styčných ploch vloženého měřeného vzorku může docházet k ovlivnění změřených hodnot štěrbinou mezi pólovými nástavci jha a vzorkem. Výsledná hysterezní smyčka je výrazně plošší a změřená maximální permeabilita je na řádově nižší hodnotě. Další chyba může vzniknout vložením příliš tenkého vzorku do měřicí cívky. Stěna vzorku je v takovém případě příliš daleko od Hallovy sondy a dochází k odchýlkám způsobeným nehomogenním polem kolem vzorku.

6.5 Možnosti úprav

V principu není obtížné modifikovat návrh konstrukce permeamtru tak, aby bylo možné jej připojit do PC přímo bez zapisovače. Důvod, proč tomu tak není, je nedostatek paměti a výpočetního výkonu v mikropočítači, který řídí permeametr. Rozdělení činnosti na řízení permeamtru a měření napětí je výhodnější i z hlediska modulárnosti a v případě potřeby bude možné snadno modifikovat již funkční zařízení výměnou některého z bloků.

Kapitola 7

Závěr

V rámci této diplomové práce jsem shrnul poznatky o konstrukci permeamtru ing. Mikulce, doplnil je některými znalostmi z problematiky měření měkkých fero-(feri-)magnetik a vytvořil jeho kompletní dokumentaci.

Analýzou obvodového řešení jsem dospěl k závěru, že není vhodné vytvářet digitální funkční bloky, které by nahradily části původního permeamtru. Výhodnější je využití jen malých částí původní konstrukce jako je řídicí obvod pro Hallovu sondu nebo výstupní zesilovač pro budící cívky. Tyto bloky bych miniaturizoval a následně doplnil řídicí elektronikou s mikropočítačem a komunikačním rozhraním.

Pro potřeby měření s novým permeametrem byl upraven a doplněn řídicí software LS Oscilo.

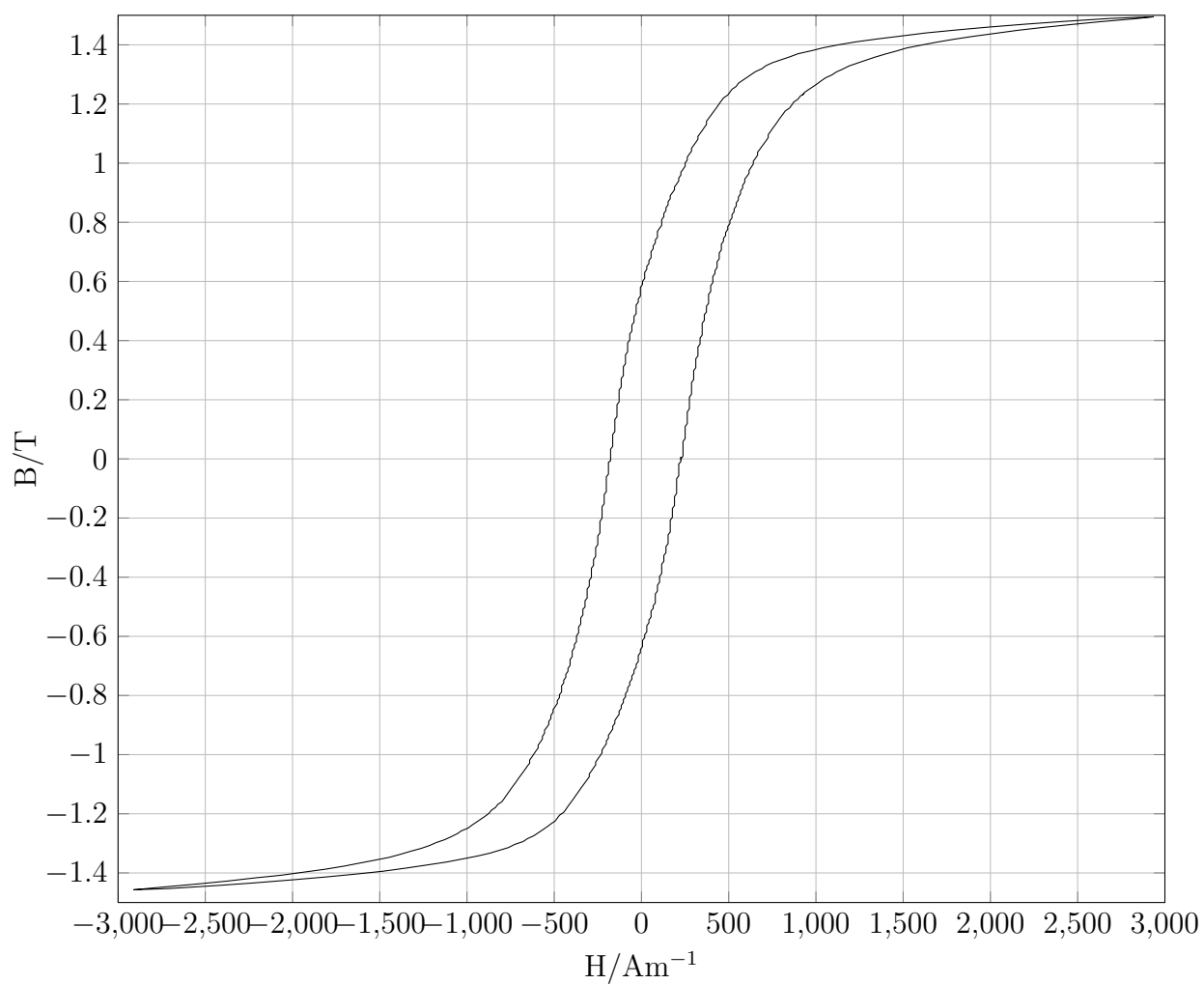
Dalším principiálně možným krokem ke zvýšení modulárnosti konstrukce a zlepšení parametrů je náhrada integrátoru citlivým AD převodníkem a přesunutí integrace přímo do řídicího mikropočítače nebo hradlového pole.

Literatura

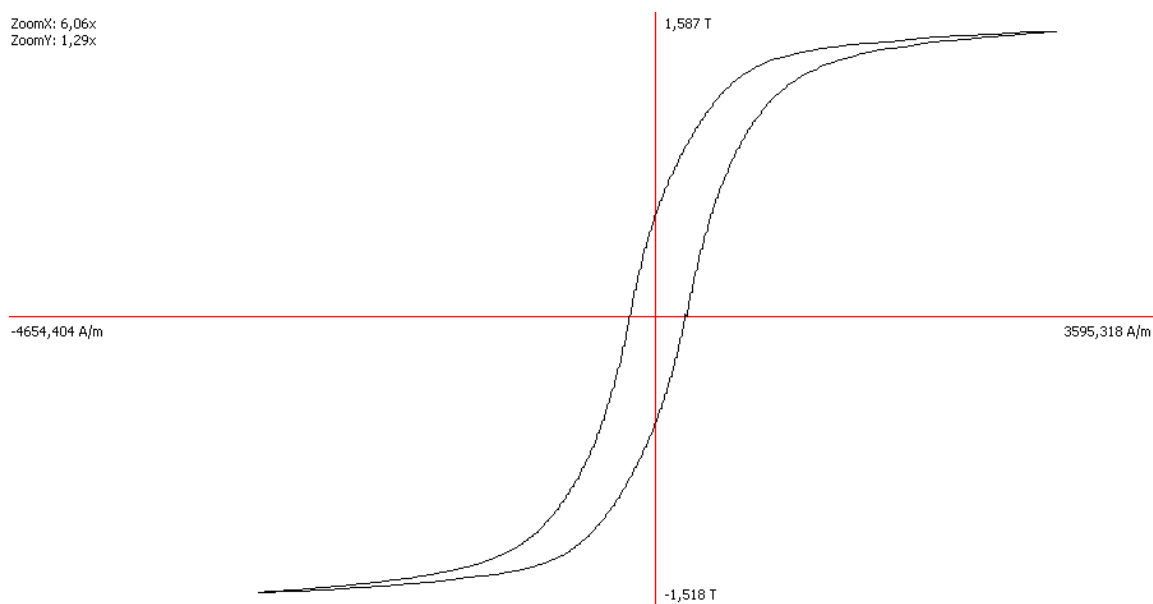
- [1] SOLYMAR, Laszlo; WALSH, Donald. *Electrical properties of materials*. 7th ed. New York : Oxford University Press, 2004, 402 s. ISBN 01-992-6793-6.
- [2] SPALDIN, Nikola. *Magnetic Materials: Fundamentals and Device Applications*. Vyd. 1. Cambridge : Cambridge University Press, 2003. 224 s. ISBN 978-0521016582.
- [3] KITTEL, Charles. *Úvod do fyziky pevných látek*. Praha : Academia, 1985. 598 s.
- [4] SEDLÁČEK, Josef. *Materials and technology for electronics : exercises*. Vyd. 1. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. 63 s. ISBN 978-80-01-03600-6.
- [5] SAITO, Tetsuya. *Springer handbook of materials measurement methods*. Germany : Springer, 2006. 1208 s. ISBN 35-402-0785-6.
- [6] HAASZ, Vladimír; SEDLÁČEK, Miloš. *Elektrická měření : přístroje a metody*. Vyd. 2. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2003. 337 s. ISBN 80-01-02731-7.
- [7] DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. Vyd. 1. Praha : BEN - technická Literatura, 2005. 536 s. ISBN 80-7300-049-0.
- [8] KAŠPAR, Petr. *Elektronická integrace v magnetických měřeních*. Praha : Kandidátská dizertační práce. 1987.
- [9] *Základní kurz fyziky* MFF UK [online]. [cit. 2013-12-19]. Dostupné z WWW: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/www/fyzika.html

Příloha A

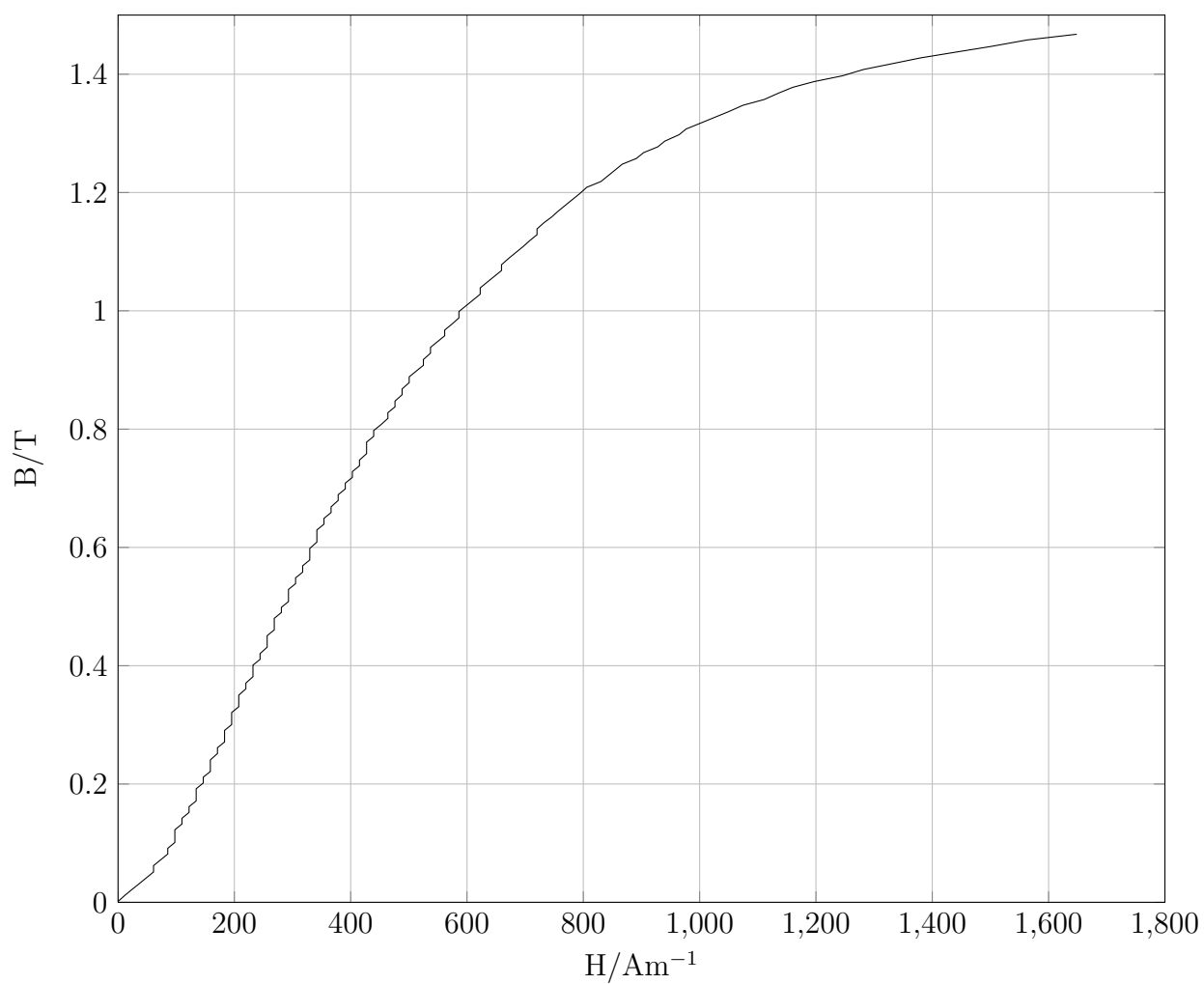
Charakteristiky



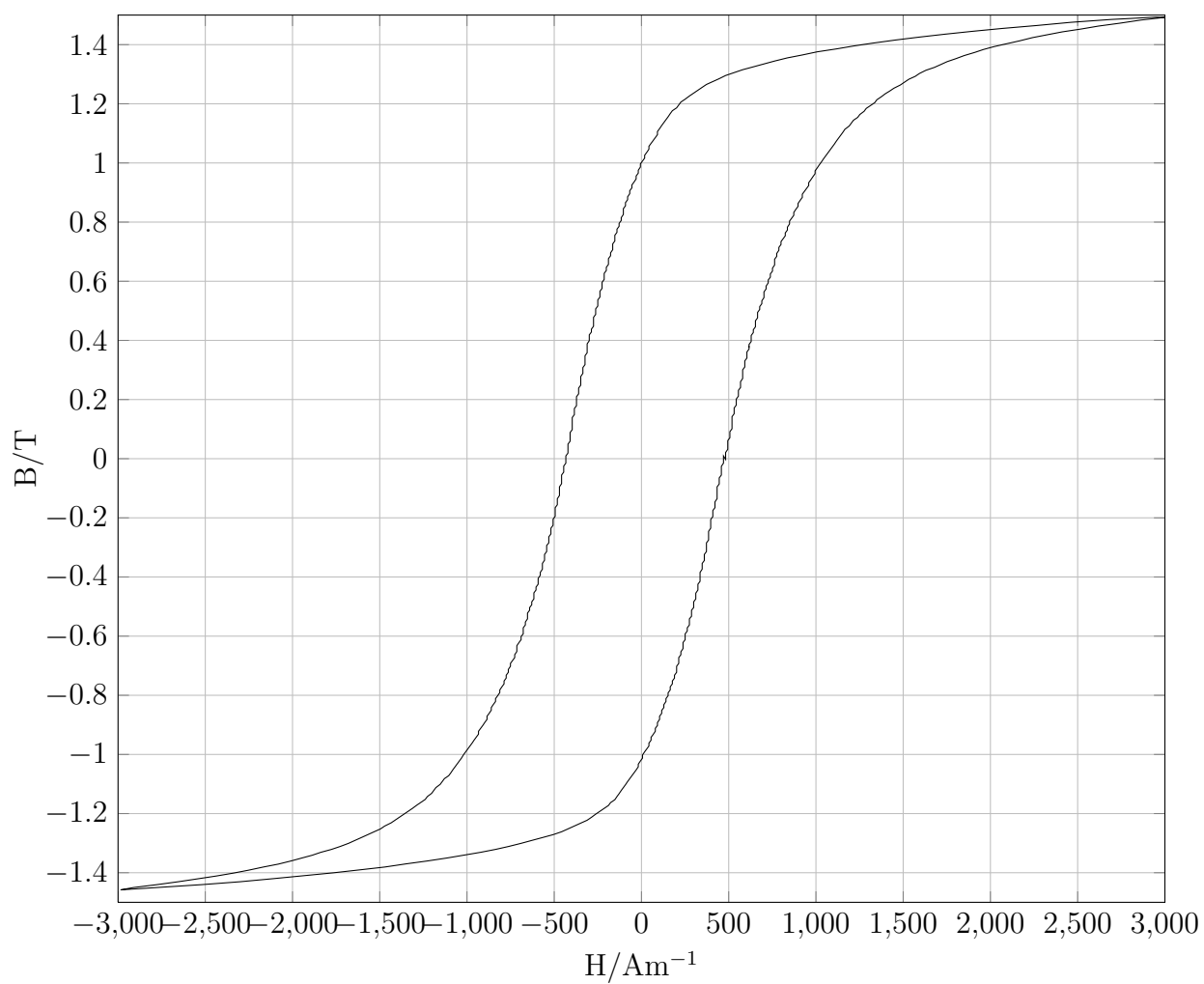
Obrázek A.1: Hysterezní smyčka materiálu 2C



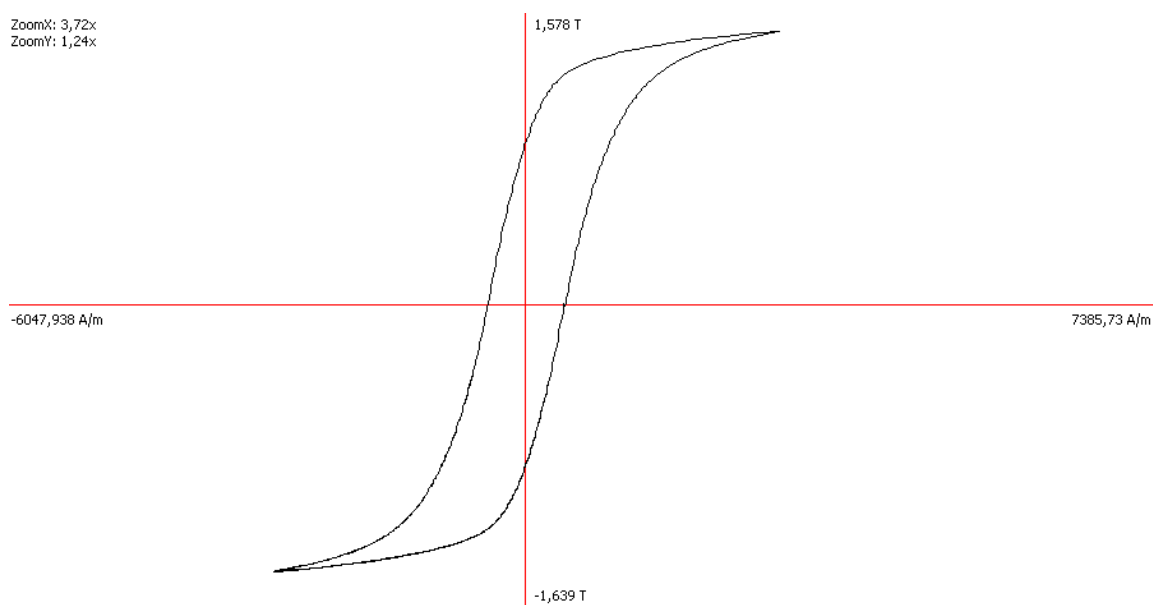
Obrázek A.2: Hysterezní smyčka materiálu 2C uložená z ovládacího SW.



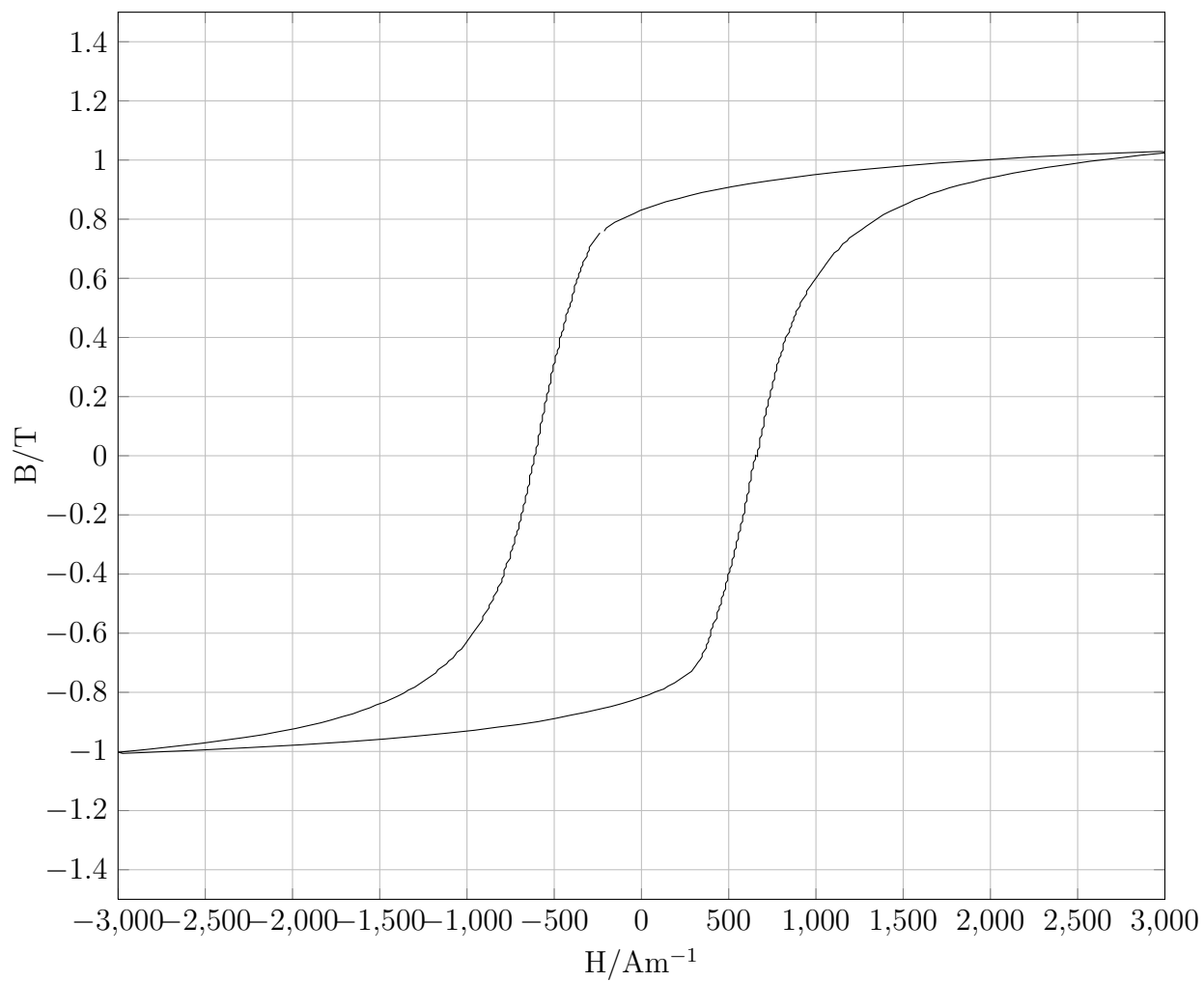
Obrázek A.3: Křivka prvotní magnetizace materiálu 2C



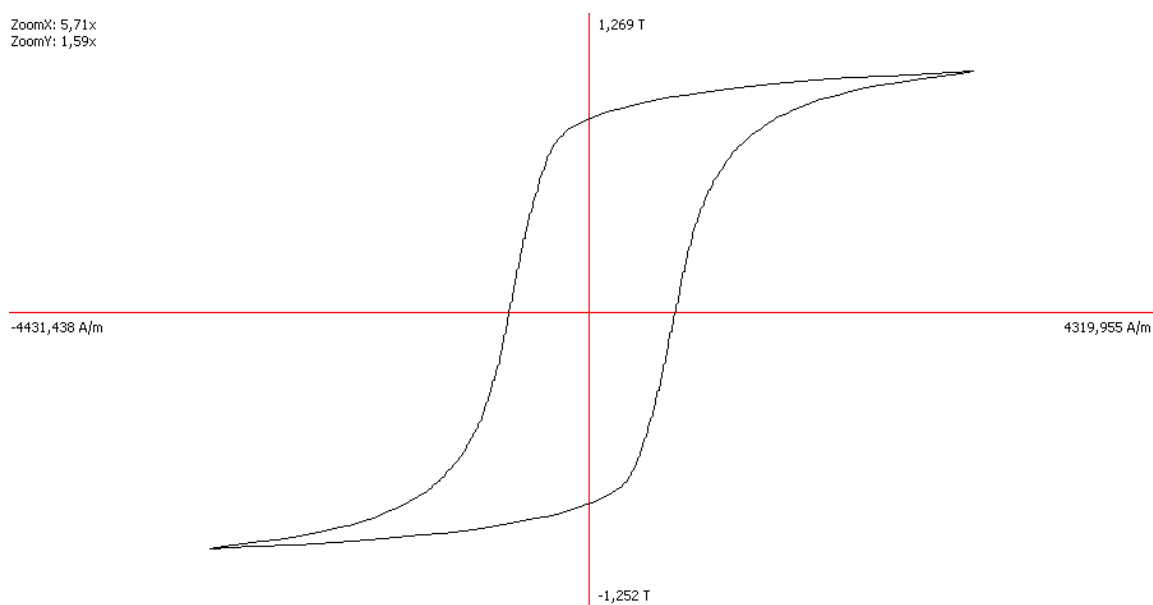
Obrázek A.4: Hysterezní smyčka materiálu 16420



Obrázek A.5: Hysterezní smyčka materiálu 16420 uložená z ovládacího SW.



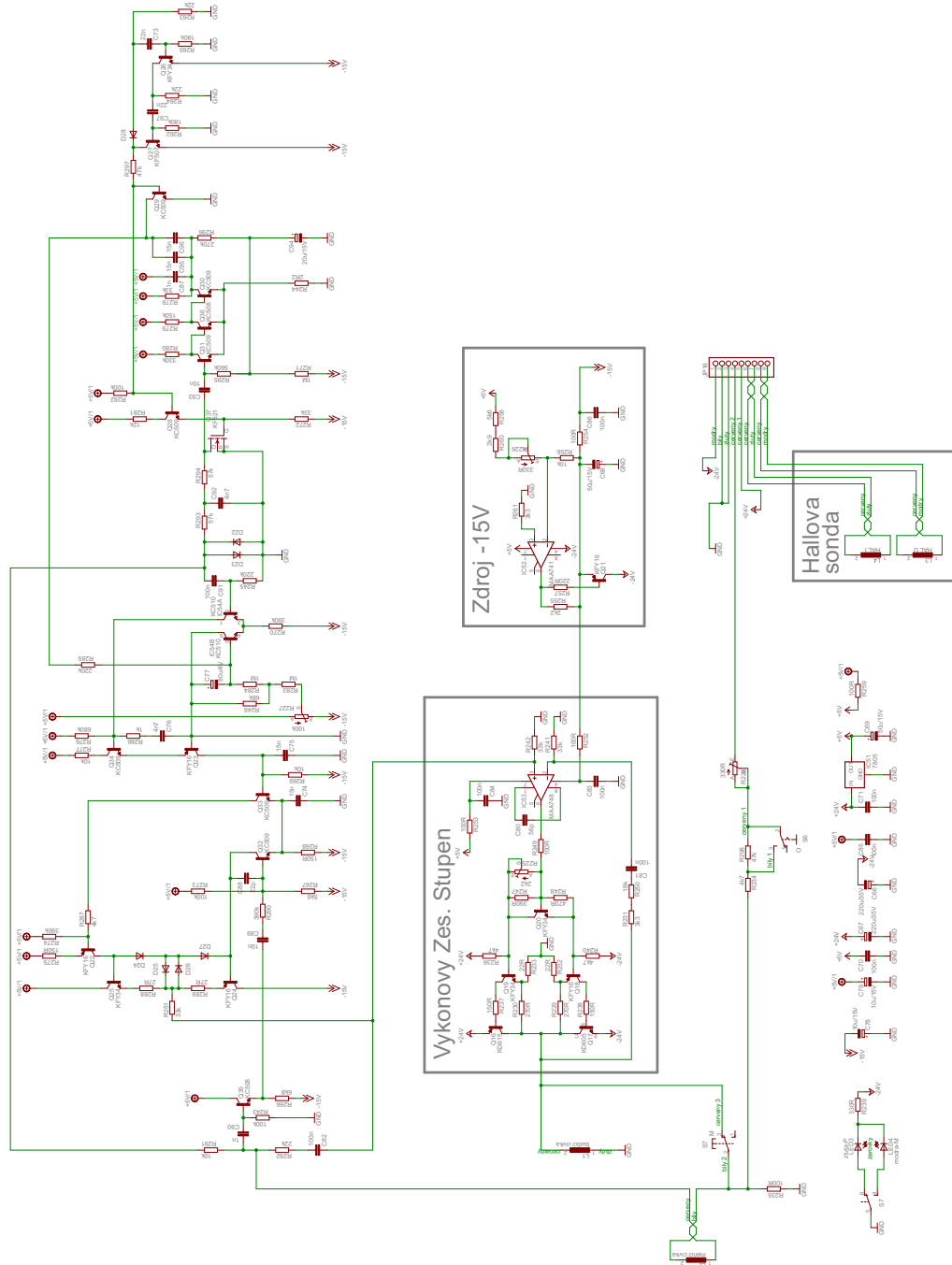
Obrázek A.6: Hysterezní smyčka materiálu 2002.1



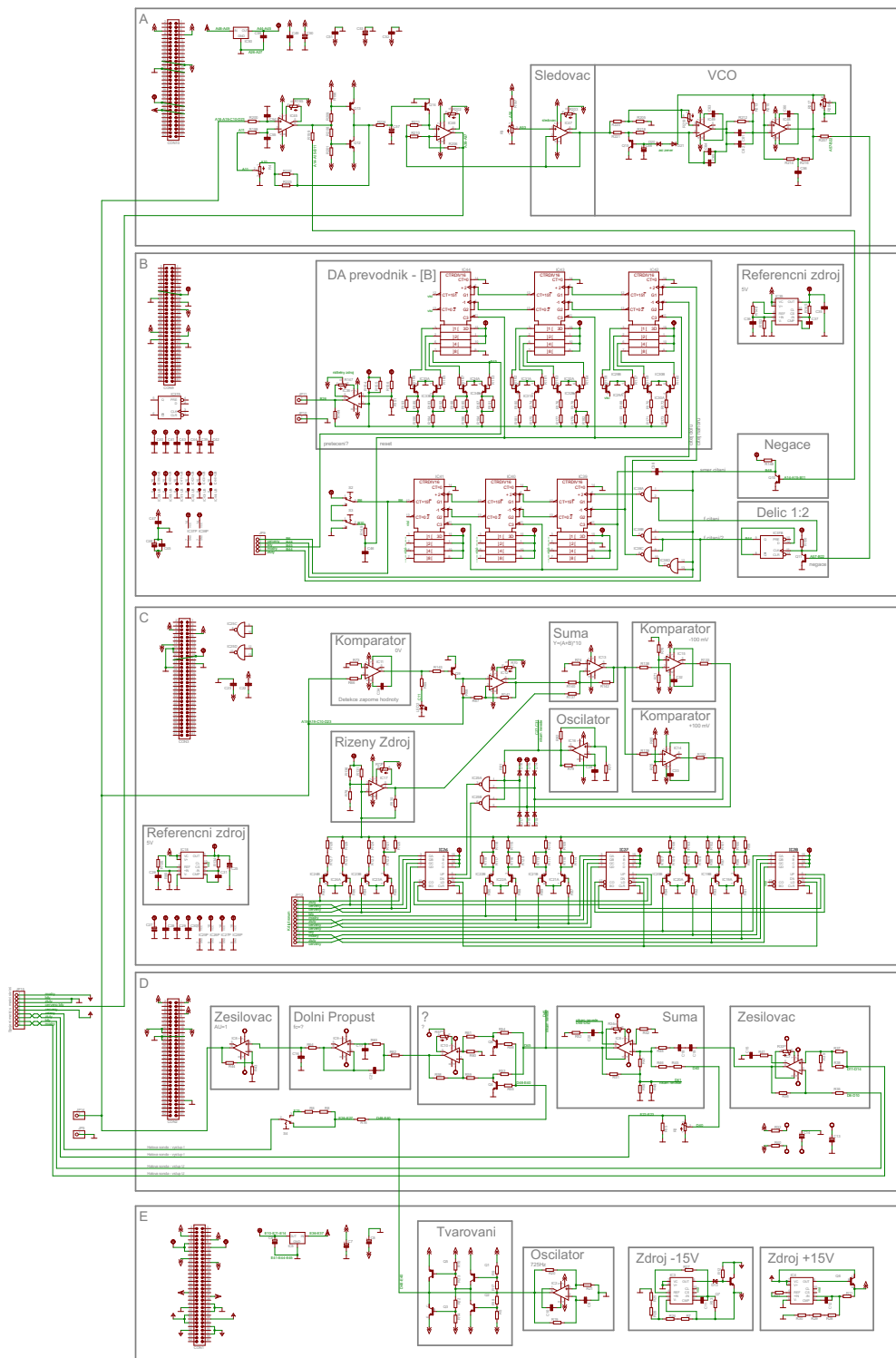
Obrázek A.7: Hysterezní smyčka materiálu 2002.1 uložená z ovládacího SW.

Příloha B

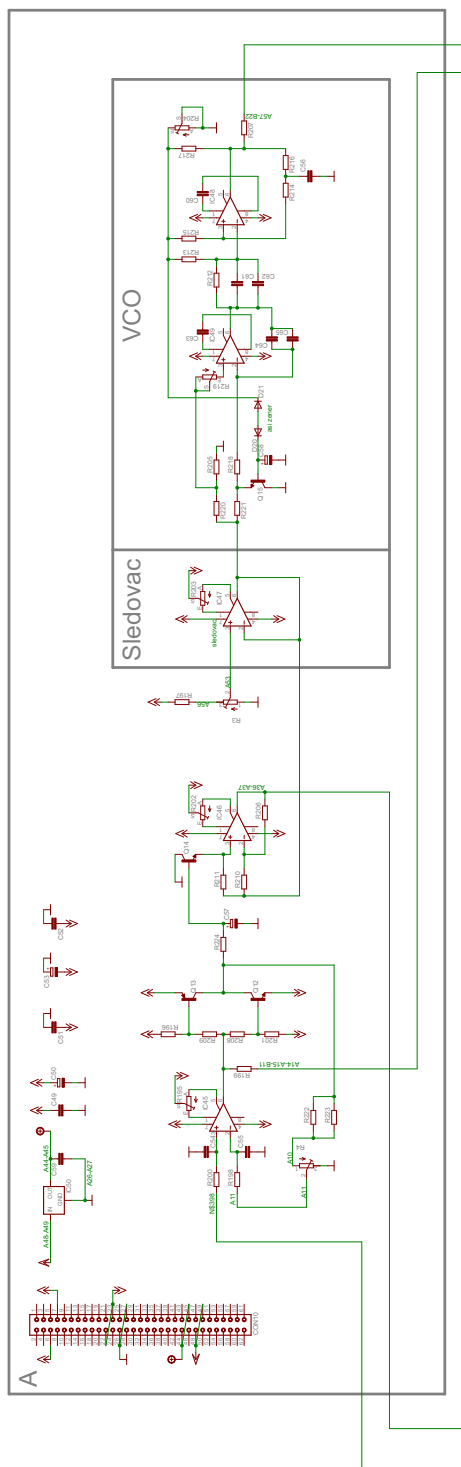
Elektronická schémata



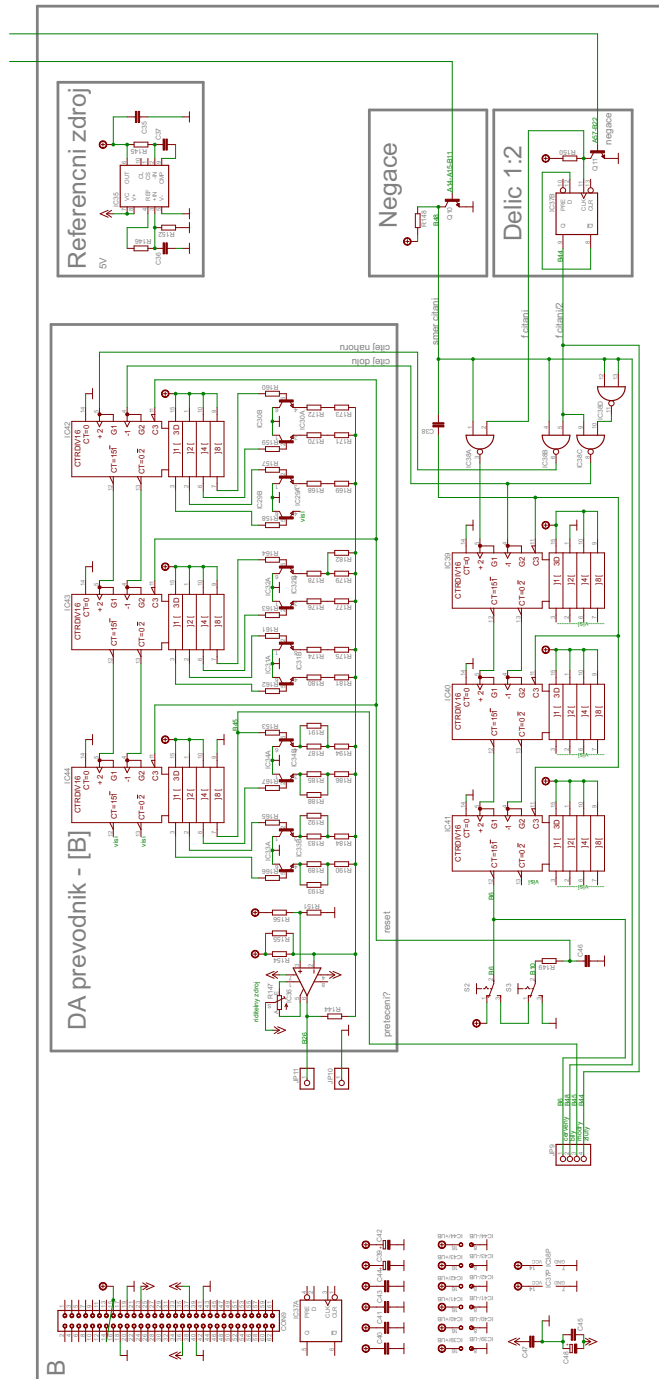
Obrázek B.1: Schéma měřící části



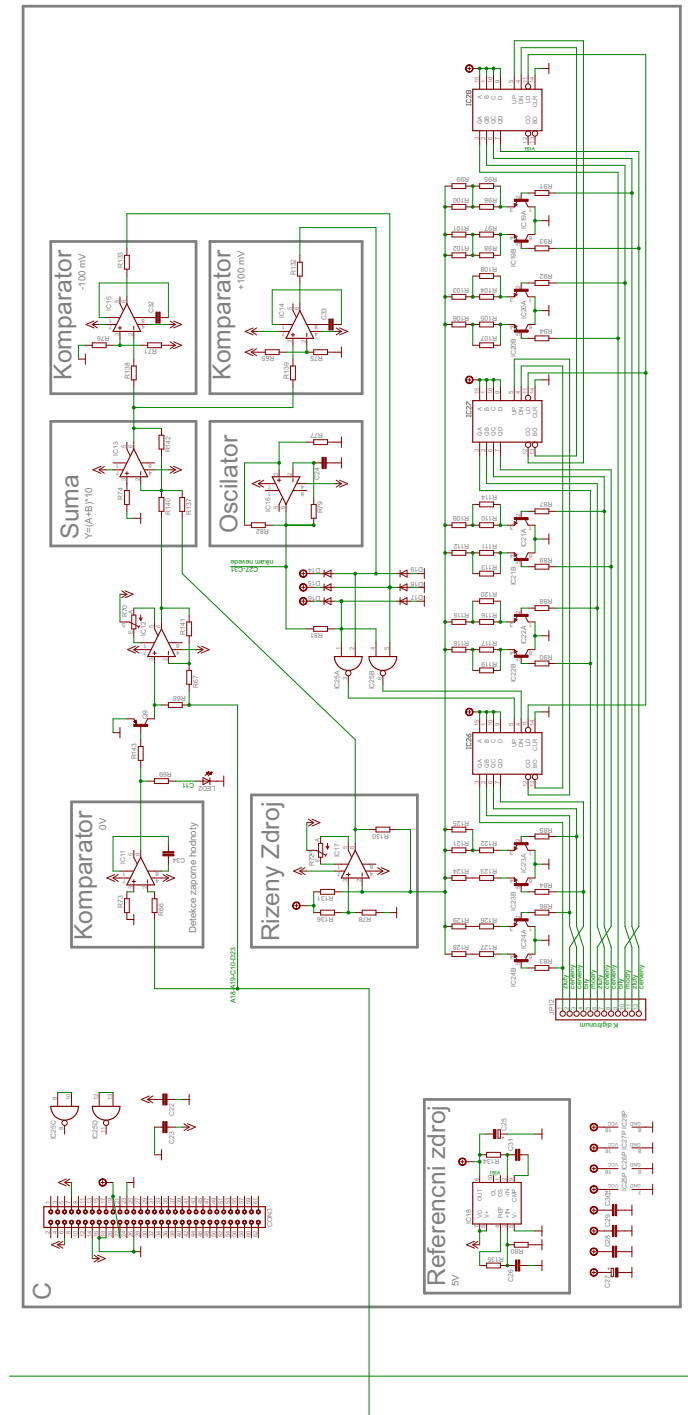
Obrázek B.2: Schéma zobrazovací části



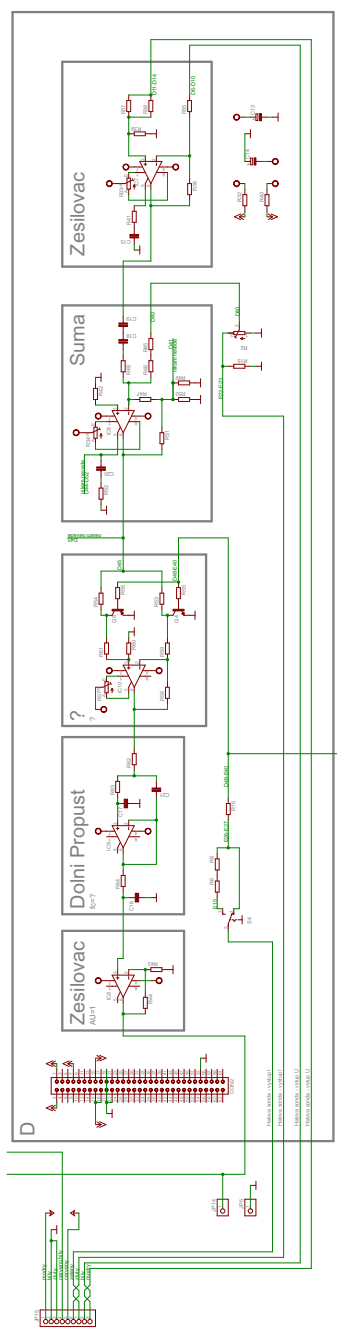
Obrázek B.4: Schéma desky A zobrazovací části



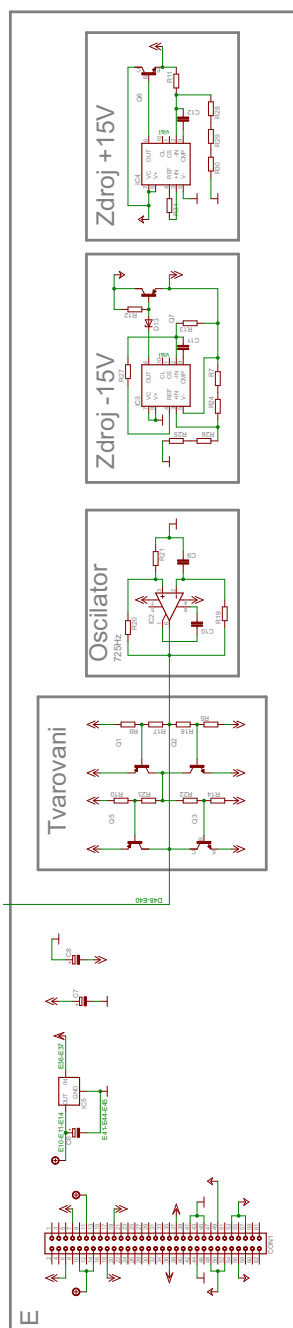
Obrázek B.5: Schéma desky B zobrazovací části



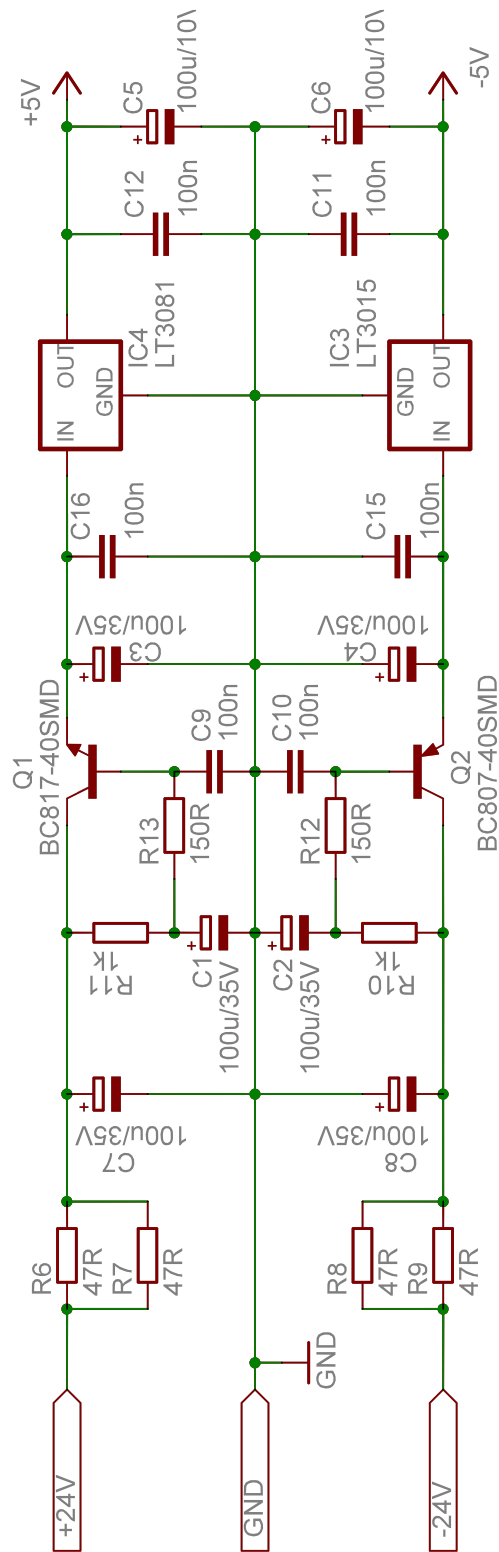
Obrázek B.6: Schéma desky C zobrazovací části



Obrázek B.7: Schéma desky D zobrazovací části



Obrázek B.8: Schéma desky E zobrazovací části



Obrázek B.9: Schéma modernizovaného zdroje

Příloha C

Fotodokumentace



Obrázek C.1: Fotografie zapisovače

Příloha D

CD-ROM

K této práci je přiloženo CD, na kterém je uložena elektronická verze této práce, doprovodný SW a katalogové listy.

- `\DATASHEET`
Tento adresář obsahuje katalogové listy většiny použitých součástek a obvodů.
- `\DRIVER`
Tento adresář obsahuje ovladač k USB převodníku CP2102 modifikovaný pro zapisovač.
- `\SOFTWARE`
Tento adresář obsahuje ovládací software zapisovače.
- `\SOURCE`
Tento adresář obsahuje zdrojový kód pro hlavní řídicí procesor zapisovače.
- `\TEX`
Tento adresář obsahuje zdrojový kód této práce v editoru \LaTeX .