

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TEORETICKÉ ELEKTROTECHNIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Magnetostrikce u speciálních materiálů v elektrotechnice

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej VALTER**
Osobní číslo: **E13B0091P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Magnetostrikce u speciálních materiálů v elektrotechnice**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Prostudujte zdroje na téma speciálních materiálů v elektrotechnice se zaměřením na magnetostrikci.
2. Popište fyzikální jev magnetostrikce a proveďte rešerši na dané téma.
3. Navrhněte a realizujte měření magnetostrikce a uveďte aplikace v technické praxi.

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na speciální magnetostrickní materiály, které se využívají v elektrotechnice. První část práce se věnuje obecným vlastnostem magnetických materiálů a jejich dělením. Druhá část se zabývá fyzikálním jevem magnetostricke a materiály, které tuto vlastnost vykazují. Poslední část se orientuje na návrh a tvorbu měřicího přípravku, realizaci měření magnetostricke. Měření bylo prováděno s využitím přístroje pro termomechanickou analýzu Q400, ale s měřením pouze změn rozměrů materiálu bez řízeného ohřevu. V závěru jsou shrnuta naměřená data a je zde také uvedeno, jak by bylo možno v budoucnu zpřesnit a zefektivnit měření.

Klíčová slova

Magnetostricke, permeabilita, hysterezní smyčka, feromagnetismus, Terfenol-D, Galfenol, Alfenol, termomechanická analýza, Joulův jev, magnetostrickní snímač vzdálenosti, magnetostrickní budiče ultrazvuku, ultrazvukové svařování, teplotní roztažnost.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the special magnetostrictive materials used in electrotechnics. The first part deals with general properties of magnetic materials and their distribution. The second part is focused on the physical phenomenon of magnetostriction and materials that indicates this property. The last part is oriented at design and preparation of experimental measurement, measuring of the magnetostriction and application in technical praxis. Measuring was made by device originally intended for thermomechanical analysis Q400, but it was used only for measurement of dimensional changes without heating process.

Key words

Magnetostriction, permeability, hysteresis loop, ferromagnetism, Terfenol-D, Galfenol, Alfenol, thermomechanical analysis, Joule effect, magnetostrictive distance sensor, magnetostrictive ultrasound exciters, ultrasound welding, temperature expansion.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Ondřej Valter

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Koudelovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a dále Doc. Ing. Radkovi Polanskému, Ph.D. za pomoc při realizaci měření magnetostrikce v laboratoři a jeho cenných rad.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 MAGNETICKÉ MATERIÁLY	11
1.1 VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ.....	11
1.1.1 Permeabilita a susceptibilita.....	12
1.1.2 Hysterezní smyčka a magnetizační křivka.....	12
1.1.3 Ztráty v magnetickém obvodu.....	13
1.1.4 Magnetická anizotropie.....	14
1.2 DĚLENÍ PODLE TVARU HYSTEREZNÍ KŘIVKY.....	14
1.2.1 Magneticky měkké materiály.....	15
1.2.2 Magneticky tvrdé materiály.....	15
1.3 DĚLENÍ PODLE PERMEABILITY.....	15
1.3.1 Diamagnetika.....	16
1.3.2 Paramagnetika.....	16
1.3.3 Feromagnetika.....	17
1.3.4 Ferimagnetika.....	18
2 MAGNETOSTRIKCE	19
2.1 JOULŮV JEV.....	19
2.2 KOEFICIENT MAGNETOSTRIKCE.....	19
2.3 KLASICKÉ MAGNETOSTRIKČNÍ MATERIÁLY.....	20
2.3.1 Feromagnetické prvky.....	20
2.3.2 Permalloye.....	21
2.3.3 Magnetostrikční slitiny.....	22
2.4 SPECIÁLNÍ MAGNETOSTRIKČNÍ MATERIÁLY.....	22
2.4.1 Terfenol-D.....	22
2.4.2 Galfenol.....	23
2.4.3 Alfenol.....	23
2.4.4 Kovová skla.....	24
2.5 POUŽITÍ MAGNETOSTRIKČNÍCH MATERIÁLŮ.....	24
2.5.1 Magnetostrikční snímač vzdálenosti.....	24
2.5.2 Magnetostrikční snímač síly.....	26
2.5.3 Ultrazvukové reproduktory.....	27
2.5.4 Magnetostrikční mikroaktuátory.....	28
2.5.5 Magnetostrikční budiče ultrazvuku.....	28
2.5.6 Ultrazvukové svařování.....	29
3 MĚŘENÍ MAGNETOSTRIKCE	30
3.1 TERMOMECHANICKÁ ANALÝZA.....	30
3.1.1 Princip TMA.....	31
3.1.2 Uspořádání aparatury TMA.....	31
3.2 ZHOTOVENÍ MĚŘÍCIHO PŘÍPRAVKU.....	32
3.2.1 Návrh cívky.....	32
3.2.2 Výroba cívky.....	33
3.3 PŘÍPRAVA FEROMAGNETICKÝCH VZORKŮ.....	33
3.3.1 Teplotní roztažnost.....	34
3.4 REALIZACE MĚŘENÍ.....	35
3.4.1 Schéma zapojení.....	36
3.4.2 Naměřené hodnoty a grafické závislosti.....	37
4 ZÁVĚR	41

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	43
PŘÍLOHY	A

Úvod

Předložená bakalářská práce se zabývá speciálními magnetostrickými materiály a jejich použitím v praxi. Magnetostricke je známý jev, který se vyskytuje u feromagnetických materiálů při vložení do magnetického pole, způsobující vibrace transformátorových plechů a jejich následné zvukové projevy, ale také ztráty v magnetickém obvodu elektrických zařízení. To je v praxi potlačeno použitím speciálních materiálů, které vykazují minimální magnetostrickí efekt. Dále jsou tyto materiály používány k výrobě nejrůznějších snímačů vzdálenosti a podobných aplikacích. V souvislosti se stále zvyšujícími se nároky na přesné zjišťování polohy v automatizační technice je potřeba neustále vyvíjet nové a lepší materiály, které mají lepší vlastnosti. Měření magnetostrických vlastností je vcelku složitá věc, neboť změny rozměrů probíhají v mikroskopických měřítkách. Feromagnetický materiál může měnit svoje rozměry nejen díky magnetostricki (při vložení do magnetického pole), ale také vlivem teplotní roztažnosti materiálu, pokud při měření dochází k teplotním změnám měřeného vzorku. V mé práci jsem měření magnetostricke řešil vytvořením přípravku s cívkou, která byla napájena ze zdroje stejnosměrného napětí a vytvářela tak neměnné magnetické pole. Do cívky jsem vložil feromagnetický materiál a celé toho uspořádání jsem spojil s přístrojem Q400 používaným pro termomechanické analýzy materiálů. [1, 2, 3, 4]

Seznam symbolů a zkratk

μ_r	relativní permeabilita (-)
μ_0	permeabilita vakua ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)
μ	absolutní permeabilita ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)
κ_m	magnetická susceptibilita (-)
M	magnetizace ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)
B	magnetická indukce (T)
B_r	remanentní magnetická indukce (T)
B_s	nasycená magnetická indukce (T)
H	intenzita magnetického pole ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)
H_c	koercitivní intenzita magnetického pole ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)
H_s	nasycená intenzita vnějšího magnetického pole ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)
λ_l	koeficient délkové magnetostrikce (-)
λ_v	koeficient objemové magnetostrikce (-)
λ_s	koeficient nasycené magnetostrikce (-)
Δl	změna délky vzorku (m)
l	délka vzorku (m)
l_0	počáteční délka vzorku (m)
T_c	Curieova teplota ($^{\circ}\text{C}$)
f	frekvence magnetizačního proudu (Hz)
V	objem materiálu (m^3)
ΔV	změna objemu materiálu (m^3)
ρ	hustota materiálu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
p	měrné ztráty ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$)
R_m	magnetický odpor (H^{-1})
l_{FE}	délka železa (m)
S_{FE}	průřez železa (m^2)
L	indukčnost (H)

1 MAGNETICKÉ MATERIÁLY

Magnetické látky jsou v elektrotechnice hojně využívány. Lze je dělit dle několika pohledů. Hlavní dělení spočívá ve tvaru hysterezní smyčky, a to na magneticky měkké a magneticky tvrdé materiály. Další dělení vychází z velikosti absolutní permeability. Pokud látku umístíme do magnetického pole, bude se v případě diamagnetik a paramagnetik chovat jednotvárně a můžeme její chování v poli téměř zanedbat. Naopak, pokud to bude látka feromagnetická (feromagnetika, ferimagnetika), budou se její feromagnetické vlastnosti projevovat výrazněji. [1, 5]

1.1 Vlastnosti magnetických materiálů

Aby látka vykazovala magnetické vlastnosti, je nutné, aby její atomy měly magnetický moment. Tento moment: „je tvořen součtem orbitálního magnetického momentu elektronu a spinového magnetického momentu elektronu“. Při zjednodušení lze říci, že orbitální magnetický moment je způsoben pohybem elektronu po kruhové dráze. Vliv spinového magnetického momentu jádra, způsobeného rotací elektronu kolem vlastní osy, lze na magnetizaci látky zanedbat. [1]

Vložíme-li tedy materiál do vnějšího pole s intenzitou H , dojde k magnetizaci látky. Výsledné magnetické pole je poté dáno vektorovým součtem vnějšího pole \bar{H} a pole zmagnetované látky (vektor magnetizace) \bar{M} , jak ukazuje následující rovnice [5]

$$\bar{B} = \mu_0(\bar{H} + \bar{M}) = \mu_0(\bar{H} + \kappa_m \bar{H}) = \mu_0(1 + \kappa_m)\bar{H} = \mu_0\mu_r \bar{H}, \quad (1)$$

kde \bar{B} je vektor magnetické indukce, μ_0 je permeabilita vakua, \bar{H} je intenzita magnetického pole, \bar{M} je vektor magnetizace, κ_m je susceptibilita a μ_r je poměrná permeabilita. Vektor magnetizace \bar{M} je definován jako podíl součtu magnetických momentů atomů látky a objemové jednotky dle následujícího vztahu [3]

$$\bar{M} = \frac{\sum \bar{m}_l}{V}, \quad (2)$$

kde m_l je elementární magnetický moment atomu látky a V je objem látky.

Prostředí, které má magnetické vlastnosti, je dáno svou poměrnou permeabilitou a magnetickou susceptibilitou. Tyto dvě veličiny jsou spolu jednoznačně provázány, jak je dále vysvětleno. [1]

1.1.1 Permeabilita a susceptibilita

Absolutní permeabilita μ vyjadřuje působení vnějšího pole na magnetický stav látky. Je definována jako poměr magnetické indukce B a intenzity vnějšího magnetického pole H . Také ji lze zapsat součinem relativní permeability a permeability vakua, která představuje konstantu $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$. Relativní permeabilita je bezrozměrná veličina, charakterizující daný materiál. Platí pro ni následující vztah [7]

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_0 \mu_r. \quad (3)$$

Magnetická susceptibilita κ_m je bezrozměrná veličina, která vyjadřuje chování materiálu ve vnějším magnetickém poli. Je definována jako poměr magnetizace a intenzity magnetického pole. Platí pro ni následující vztah [1]

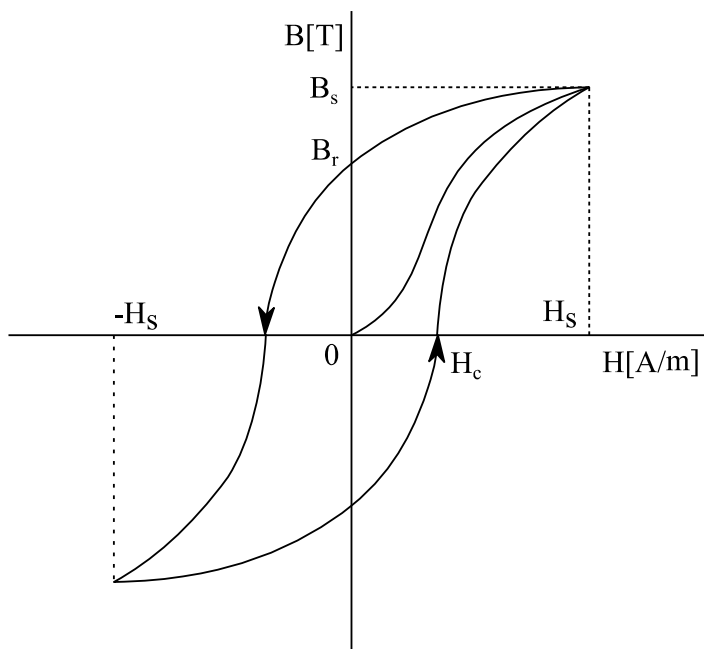
$$\kappa_m = \frac{M}{H} = \mu_r - 1. \quad (4)$$

1.1.2 Hysterezní smyčka a magnetizační křivka

Při vložení nezmagnetované látky do magnetického pole se bude tato látka magnetizovat. V magnetizační charakteristice $B = f(H)$ se při zvyšování intenzity H bude měnit indukce B po magnetizační křivce (křivce prvotní magnetizace) a také permitivita, která je vlastně tečnou k magnetizační křivce v daném bodě. Při další cyklické změně vnějšího pole se vytvoří uzavřená hysterezní křivka, která je znázorněná na Obr. 1-1. Magnetická hystereze vyjadřuje zpoždění poklesu magnetické indukce za poklesem intenzity a je dána nenávratnými změnami Blochových stěn. [8]

Intenzita vnějšího pole, při které se již magnetizace nebude téměř měnit, se nazývá nasycená intenzita H_s . Plocha uzavřené křivky magnetizace je úměrná hysterezním ztrátám a tvar hysterezní křivky je dán technologií výroby materiálů, tj. chemickým složením a krystalickou mřížkou. Koercitivní intenzita H_c magnetického pole je taková intenzita,

při které klesne remanentní magnetická indukce na nulu. Velikost indukce, kterou bude vykazovat materiál při snížení intenzity pole na nulu, se nazývá remanentní neboli zbytková indukce B_r . [1, 9]



Obr. 1-1 Hysterezní křivka [9]

1.1.3 Ztráty v magnetickém obvodu

Při působení vnějšího střídavého pole vznikají v materiálu ztráty, které lze zaznamenat zvýšením teploty magnetického obvodu. Celkové ztráty se skládají ze ztrát vířivými proudy, ztrát hysterezních a přídavných. Jsou dány objemem materiálu, měrnými ztrátami a hustotou materiálu. Měrné ztráty p jsou doplněny údaji o magnetické indukci a frekvenci, při které byli naměřeny. Platí pro ně vztah [1]

$$P_{Fe} = P_v + P_h + P_p = V \cdot \rho \cdot p, \quad (5)$$

kde P_v jsou ztráty vířivými proudy, P_h jsou ztráty hysterezní, P_p jsou přídavné ztráty, V je objem materiálu, ρ je hustota materiálu a p jsou měrné ztráty.

Ztráty vířivými proudy P_V vznikají díky elektrické vodivosti feromagnetik. Jejich zmenšení lze provést výběrem materiálu s menší elektrickou vodivostí (např. křemíkové oceli, ferity) a také skládáním obvodů z tenkých plechů navzájem izolovaných. [7]

Hysterezní ztráty P_H vznikají díky hysterizi při cyklickém magnetování. Jejich velikost závisí na ploše hysterezní smyčky. Jsou způsobeny nevratnými posuvy doménových stěn a natáčením vektorů magnetizace. Lze se snížit použitím materiálu s užší hysterezní smyčkou, avšak v porovnání se ztráty vířivými proudy jsou výrazně menší. [8]

Přídavné ztráty P_P lze vypočítat jako rozdíl celkových ztrát a součtu ztrát vířivých a hysterezních. Tyto ztráty tedy nelze samostatně vypočítat. Jsou dány například nedokonalým stažením magnetického obvodu, okrajovými jevy, apod. [1]

1.1.4 Magnetická anizotropie

Jev, kdy v různých směrech krystalu má látka různé magnetické vlastnosti, se nazývá magnetická anizotropie. Ta je typická pro monokrystalické látky, tj. látky složené z jednoho krystalu. Rozložení jeho částic v látce je dalekosáhlé a periodicky se opakuje (např. NaCl, diamant). Rozlišujeme anizotropii krystalovou, magnetoelastickou a tvarovou. [10]

Naopak látky polykrystalické, složené z velkého množství malých krystalů (zrn), vykazují izotropii, tedy vlastnost, kdy má krystal stejné magnetické vlastnosti ve všech směrech. Jejich částice jsou uspořádány pravidelně, avšak zrna jsou již situovány nahodile. Takovou vlastnost má většina pevných látek (všechny kovy). [10, 11]

1.2 Dělení podle tvaru hysterezní křivky

Podle tvaru hysterezní křivky dělíme magnetické materiály na magneticky měkké, které se lehce magnetují a mají úzkou hysterezní křivku a magneticky tvrdé, jejichž hysterezní křivka je široká a lze je hůře zmagnetovat. Existují další typy např. pravoúhlý nebo perminvarový typ, který má střední část hysterezní křivky zúženou. [1]

1.2.1 Magneticky měkké materiály

Magneticky měkké materiály lze lehce zmagnetovat i odmagnetovat. K tomu je také potřeba menší množství energie, než je tomu u magneticky tvrdých, což souvisí s plochou hysterezní smyčky, která je úzká. Po těchto materiálech vyžadujeme velkou počáteční a maximální permeabilitu. Koercivita těchto materiálů je malá ($H_c < 1 \text{ kA/m}$). Tyto materiály se nejčastěji využívají v jádrech transformátorů a v elektrických točivých strojích. Hlavním zástupcem je čisté železo. To má ovšem malý měrný elektrický odpor a z tohoto důvodu jsou ztráty vířivými proudy vysoké. Proto jsou pro střídavě magnetované materiály používány slitiny železa a křemíku. Přidání křemíku totiž zvětšuje měrný odpor, a tím zmenšuje ztráty vířivými proudy. Čisté železo lze použít u stejnosměrně magnetovaných obvodů. [1, 10]

U těchto materiálů také požadujeme malý koeficient magnetostrikce, strukturu s velkými krystalovými zrny a bez poruch. Mezi zástupce patří slitiny Fe-Si, Fe-Ni, ferity a amorfní slitiny. [7]

1.2.2 Magneticky tvrdé materiály

Magneticky tvrdé materiály se používají při výrobě permanentních magnetů. Hůře se magnetují a těžko je lze i odmagnetovat. Jejich hysterezní křivka je široká. Tomu také odpovídá větší akumulovaná energie. Koercivita těchto materiálů je velká (až 1 MA/m) a vysoká je také remanentní indukce. K magneticky tvrdým materiálům patří např. slitiny typu Alnico, SmCo, neodymové magnety, martenzitické oceli a magneticky tvrdé ferity. Hodnoty remanentních indukcí se u těchto materiálů pohybují okolo 1,2 T. [1]

1.3 Dělení podle permeability

Dále dělíme magnetické materiály podle toho, jak se chovají v magnetickém poli a to podle toho, jakou mají tyto materiály relativní permeabilitu μ_r a susceptibilitu κ_m . Pak se tyto materiály dělí na diamagnetika, paramagnetika, feromagnetika, antiferomagnetika a ferimagnetika. [7]

1.3.1 Diamagnetika

Pokud je součet jednotlivých magnetických momentů záporný, nazýváme tyto látky diamagnetiky. Tyto látky nepatrně zeslabují magnetické pole. Vlastní magnetický moment získávají až tehdy, jakmile na ně začne působit vnější magnetické pole. Platí pro ně, že $\mu_r < 1$, $\kappa_m < 0$. Magnetické vlastnosti diamagnetik jsou na teplotě téměř nezávislé. Řadí se mezi ně plasty, organické látky a z kovů např. měď, stříbro, zinek, rtuť, zlato a supravodiče. [1,10]

1.3.2 Paramagnetika

Paramagnetika nepatrně zesilují magnetické pole. To je dáno kladných součtem dílčích momentů atomů, které jsou nejprve uspořádány všemi směry a teprve ve vnějším magnetickém poli se stáčí do jeho směru a látka je poté slabě zmagnetována. Pro paramagnetické látky platí, že $\mu_r > 1$, $\kappa_m > 0$. Jejich magnetické vlastnosti jsou nepřímo úměrné teplotě. Mezi hlavní zástupce této skupiny materiálů patří např. kyslík a alkalické kovy jako platina, mangan, hliník, hořčík, cín. Mezi silně paramagnetické látky (feromagnetika) patří např. železo a kobalt. Na Obr. 1-2 jsou vidět příklady některých magnetických látek. [1, 10, 12]

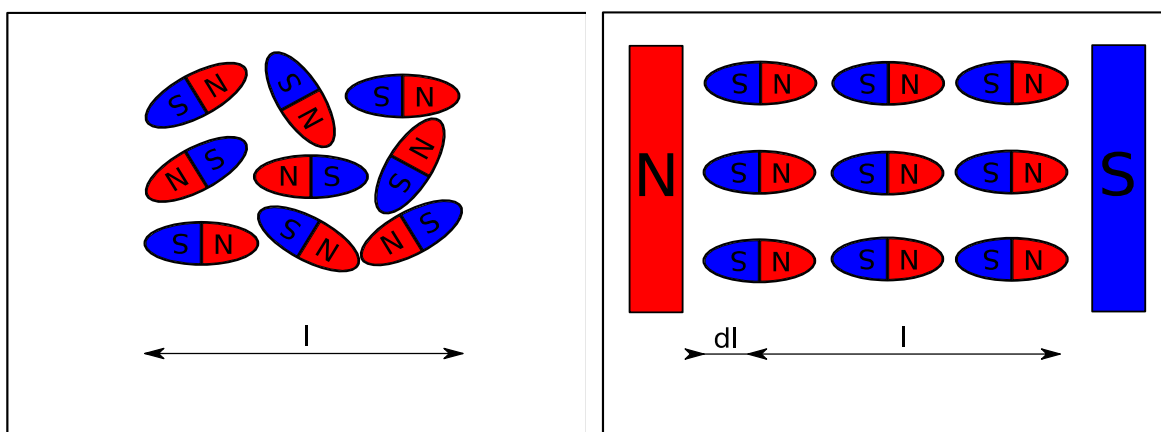


Obr. 1-2 Vlevo příklad diamagnetika-mědi, vpravo příklad paramagnetika-hliníku [13, 14]

1.3.3 Feromagnetika

Nenulový magnetický moment i bez působení vnějšího pole vykazují feromagnetické látky. Mají velmi vysokou permeabilitu až 10^6 . Tyto látky tedy značně zesilují magnetické pole. Feromagnetismus lze pozorovat nejen u pevných látek v krystalickém stavu, tak také u feromagnetických kapalin. [1,15]

Jakmile dojde k zahřátí látky na určitou teplotu, ta poté ztrácí její vlastnosti a stává se paramagnetickou. To je způsobeno tím, že tepelný pohyb dosáhne značně vysokých hodnot a domény zaniknou. Teplota, při které se tento děj odehrává, se nazývá Curieova teplota T_c . Mezi feromagnetika patří např. železo, nikl, kobalt, gadolinium, jejich slitiny a dále oxidy přechodových i jiných prvků (ferity) jako Fe, Ni, Co, Mn, Zn, Ba atd. Jejich Curieova teplota je (Fe 768°C, Ni 358°C, Co 1115°C). „Podle Weissovy teorie feromagnetizmu se každé feromagnetikum při teplotách nižších než je Curieova teplota, rozpadá na malé oblasti, tzv. domény.“ [1, 12]



Obr. 1-3 Doménová struktura feromagnetické látky (vlevo bez působení vnějšího pole, vpravo při působení vnějšího pole) [15]

Tyto domény jsou téměř makroskopické shluky atomů, velké 10^{-3} až 10^0 milimetru, které se snadno orientují ve směru vnějšího pole a navenek se chovají téměř jako miniaturní magnet. Doménová struktura je znázorněna na Obr. 1-3. Krystal vytváří takovou strukturu, jelikož jí odpovídá menší energie než při homogenním magnetování. Prostor mezi nimi se nazývá Blochova stěna, která umožňuje postupný přechod magnetických momentů z jedné orientace do druhé. Její tloušťka je asi desetina mikrometru. Jevu, kdy vznikají domény, se říká spontánní neboli samovolná magnetizace. [1, 5, 15]

1.3.4 Ferimagnetika

Ferimagnetika neboli ferity jsou keramické látky tvořící poměrně zvláštní skupinu magnetických materiálů. Jsou to sloučeniny oxidu železa a jiného kovu, např. mangan, bariem. V porovnání s feromagnetiky mají tyto látky mnohonásobně větší elektrický odpor, a proto se hojně využívají v elektrotechnice jako feritová jádra cívek, anténní tyče a tlumivky. Příklady feritů jsou na Obr. 1-4. [1, 10, 12]



Obr. 1-4 Feritová jádra [16]

2 MAGNETOSTRIKCE

U feromagnetických látek lze v mikroskopických měřítkách sledovat změny jejich rozměrů a tvaru při působení vnějšího pole. Tato nežádoucí vlastnost se projevuje například v jádrech transformátorů, a to jejich změnou rozměrů vedoucí k vibracím a nepříjemným zvukovým projevům. Naopak magnetostriktu lze využívat při konstrukci magnetostrikčních snímačů vzdálenosti a dalších aplikacích. [1]

2.1 Joulův jev

Joulův jev (magnetostrikční jev, zkráceně magnetostrikce) je vlastnost jen a pouze feromagnetických látek (železo, nikl, kobalt), která vyvolává změnu jejich rozměrů a tvaru během magnetizačního procesu. Její fyzikální princip je vysvětlen vzájemným spolupůsobením „*elektronových spinů atomů feromagnetika s vnějším magnetickým polem (mění se rovnovážné vzdálenosti atomů v mřížce[1])*.“ Při pružné deformaci feromagnetická látka naopak magnetizaci vykazuje. Tento jev byl objeven v roce 1842 Jamesem Joulem při zkoumání vzorku železa. Magnetostrikce se dělí dle působení na tvarovou (podélnou a příčnou) při prodloužení nebo zkrácení vzorku a na objemovou, která se projevuje při vysoké intenzitě pole při paraprocesu. „*Tvarová magnetostrikce souvisí s magnetizačními ději probíhajícími jak s posuvem Blochových stěn, tak stáčením vektoru spontánní magnetizace [1]*.“ Působením magnetického pole se magnetické domény látky natačí tak, aby se srovnaly s polem. Jejich natočení závisí na intenzitě vnějšího magnetického pole. [1, 9, 2, 17]

2.2 Koeficient magnetostrikce

Koeficient magnetostrikce je bezrozměrné číslo, které vyjadřuje relativní změnu délky či objemu při magnetizaci. Může být jak kladný, tak i záporný. To hodně záleží na složení materiálu. Při kladném koeficientu materiál vykazuje prodloužení, a naopak při záporném koeficientu zkrácení.

Dále je závislý na intenzitě magnetického pole. Při určité intenzitě vnějšího pole se materiál nasytí a jeho rozměry už se nebudou téměř měnit. Tomu odpovídá nasycená hodnota koeficientu magnetostrikce λ_s . Koeficient délkové a objemové magnetostrikce je dán následujícími vztahy [1]

$$\lambda_l = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (6)$$

$$\lambda_v = \frac{\Delta V}{V_0}, \quad (7)$$

kde Δl je změna rozměru vzorku, l_0 je počáteční délka vzorku, ΔV je změna objemu vzorku a V_0 je počáteční objem vzorku.

2.3 Klasické magnetostrikční materiály

Magnetostrikční materiály jsou látky, u nichž dosahuje koeficient magnetostrikce vyšších hodnot, než u ostatních látek. Při teplotní závislosti roztažnosti některých látek lze účinky roztažení zmírnit či plně vykompenzovat slitinami se záporným koeficientem objemové magnetostrikce (např. Fe38Ni). Látky vykazující magnetostrikční jev jsou látky feromagnetické např. železo, nikl, kobalt, gadolinium a jejich sloučeniny. Příklady magnetostrikčních koeficientů při nasycení jsou znázorněny v Tabulce 2-1. [1, 9]

Materiál	$\lambda_s \cdot 10^{-6}$ [-]	Materiál	$\lambda_s \cdot 10^{-6}$ [-]
Železo	-9	TbCo ₃	65
Nikl	-35	SmFe ₂	-1500
Kobalt	-62	TbFe ₂	1753
60%Co+40%Fe	68	Fe ₃ O ₄	40
60%Ni+40%Fe	25	CoFe ₂ O ₄	-110

Tabulka 2-1-Součinitel nasycené magnetostrikce různých materiálů [8]

2.3.1 Feromagnetické prvky

Zde jsou uvedeny některé feromagnetické prvky, jejich základní vlastnosti a následné použití v praxi [8, 18]

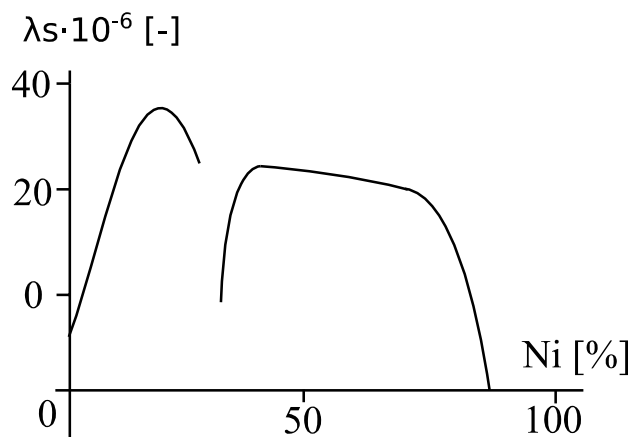
- Železo je feromagnetický kov světle šedé barvy s malou odolností vůči korozi. Je konstrukčním materiálem pro nespočetné aplikace. Používá se také

pro feromagnetické slitiny společně s niklem (permalloye). Pro magnetostrikční účely se čisté železo nepoužívá z důvodů značně složitého průběhu magnetostrikce.

- Nikl je feromagnetický kov světlešedé barvy, lesklý, poměrně těžký. Odolný vůči atmosférickým vlivům, se záporným koeficientem magnetostrikce ($-35 \cdot 10^{-6}$). Používá se ve vakuové technice, v různých slitinách (permalloye a jako povrchová ochrana kovů).
- Kobalt je feromagnetický kov bílé barvy používaný pro magnetické slitiny s železem a pro žáruvzdorné oceli. Vykazuje záporný koeficient magnetostrikce $-62 \cdot 10^{-6}$.

2.3.2 Permalloye

V některých aplikacích vyžadujeme součinitel magnetostrikce co nejmenší nebo nejlépe nulový, v jiných naopak chceme, aby dosahoval vysokých hodnot. Koeficient nasycené magnetostrikce v závislosti na obsahu niklu je znázorněn v Obr. 2-2. Permalloye jsou slitiny železa a niklu, které vynikají vysokými hodnotami permeability, malými hysterezními ztrátami a malou koercivitou. Dělíme je podle procentuálního obsahu jednotlivých prvků. Slitina Fe78Ni (PY78) vykazuje nulovou tvarovou magnetostrikci a nulovou krystalovou anizotropii (magnetické systémy měřících přístrojů). Slitiny Fe50Ni (PY50) mají větší tvarovou magnetostrikci ($24 \cdot 10^{-6}$), mají úzkou či pravoúhlou hysterezní křivku, která se hodí pro silnější pole (magnetické zesilovače). [7, 3]



Obr. 2-2 Závislost velikosti koeficientu nasycené magnetostrikce v závislosti na obsahu niklu [3]

2.3.3 Magnetostrikční slitiny

V-permendur (CV49) je magneticky měkká slitina kobaltu a železa (49 %) s vanadem (2 %). Ten dodává slitině lepší mechanické vlastnosti a opracovatelnost. Součinitel nasycené magnetostrikce dosahuje $115 \cdot 10^{-6}$. [3, 19]

Dalšího zvětšení součinitele nasycené magnetostrikce dosáhneme obsahem kobaltu 70% bez použití vanadu. Ta poté vychází $134 \cdot 10^{-6}$. [3]

2.4 Speciální magnetostrikční materiály

Existují sloučeniny prvků, které vykazují mnohem větší tvarovou magnetostrikci, než klasické magnetostrikční materiály. Jsou to slitiny železa a prvků jako terbium, dysposium a gallium. [2]

2.4.1 Terfenol-D

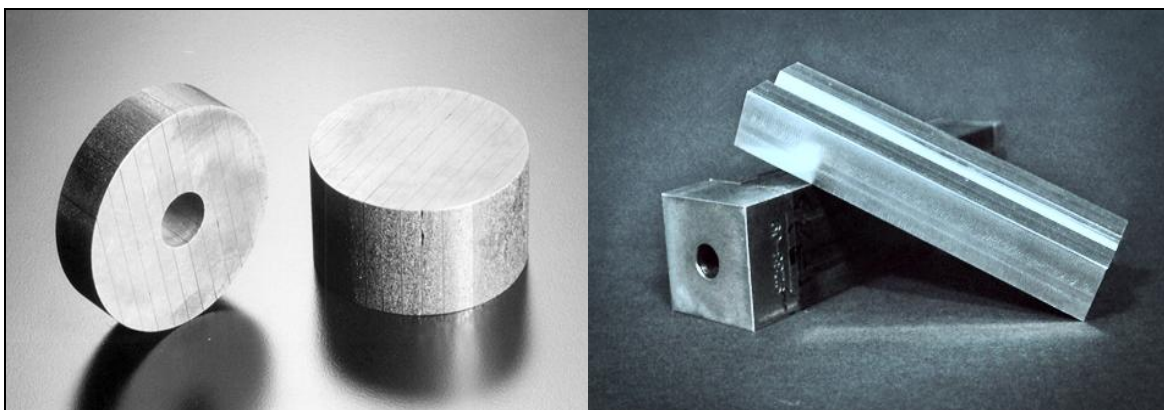
Terfenol-D je slitina terbia, dysprosia a železa v pevném skupenství. Tato látka má největší koeficient magnetostrikce ze všech známých materiálů. Magnetostrikční koeficient tohoto materiálu je až stokrát větší než u klasických magnetostrikčních materiálů. Jeho Curieova teplota je 380°C , což umožňuje změnu až $1000 \mu\text{m}$ při změně teploty z pokojové na teplotu 200°C . Úpravou složení slitiny lze dosáhnout rozšíření pracovní oblasti až do kryogenních teplot. Jeho název má základ dle obsažených prvků.

Nejprve se používaly jen prvky železo a terbium. Později se začalo přidávat i dysposium jako přísada legování ke snížení velikosti magnetického pole potřebného k vyvolání magnetostrikce. Terfenol-D vyvinutý pro vysoce výkonné sonary nabízí větší šířku pásma frekvencí a větší spolehlivost, než starší technologie. Předním světovým dodavatelem tohoto materiálu a výrobků z něj vytvořených je společnost Etrema, která vlastní mnoho patentů a licencí. Dále společnost poskytuje pomoc při návrhu a výrobě produktů z tohoto materiálu. Nevýhoda tohoto materiálu je jeho vyšší cena oproti klasickým magnetostrikčním materiálům. Ukázka materiálu je na Obr. 2-3. [2]

2.4.2 Galfenol

K objevení tohoto materiálu v roce 1999 vedla snaha najít slitinu, která by kombinovala vlastnosti mechanicky odolného niklu a velmi dobrých magnetostrikčních vlastností Terfenolu-D. Galfenol je slitina prvků gallia a železa vykazující jedinečnou kombinaci mechanických a magnetických vlastností. Schopnost galfenolu pracovat v tahu, jeho mechanická pevnost, houževnatost a vysoká Curieova teplota (600 °C) přímo indikují možnost použití této slitiny v mechanicky náročném prostředí a ve vysokých teplotách.

Zařízení mohou s použitím galfenolu převést energii vibrací na elektrickou energii. Toho lze využít např. u čerpadel, motorů, lodí a ropných vrtů. Klasickým způsobem jak získat vibrační energii je použití piezokeramiky. Galfenol má ale oproti nim výhody a to, že ho lze snadno vyrobít v nejrůznějších tvarech a velikostech. Ukázka materiálu je na Obr. 2-3. [2, 20]



Obr. 2-3 Magnetostrikční materiály společnosti Etrema-vlevo Terfenol-D, vpravo Galfenol [2]

2.4.3 Alfenol

Alfenol (někdy také Alperm nebo Alfer) je další z magnetostrikčních slitin. Obsahuje okolo 90 % železa a její zbytek tvoří hliník. Byla objevena v roce 1939 v Japonsku. Během světové války Japonci používali tuto slitinu s hliníkem, kterým byl nahrazen nikl, jako magnetostrikční převodníky v torpédech a jednoduchých námořních sonarech. Je to magneticky měkký materiál s poměrnou permeabilitou okolo 4000 a koercivitou 50 A/m.

S obsahem hliníku se zvyšuje rezistivita, která je vyšší než u běžně používaných slitin železa a křemíku, díky čemuž se dá používat ve vyšším frekvenčním pásmu. Bohužel je více náchylná k oxidaci. Alfenol je svými vlastnostmi srovnatelný se slitinou permalloy. 14-Alfenol (14% Al) má koeficient nasycené magnetostrikce $50 \cdot 10^{-6}$. Materiál může být používán pro vyšší frekvence. [21]

2.4.4 Kovová skla

Kovová skla jsou slitiny přechodových kovů (železo, nikl, kobalt, ...) a metaloidů (bor, uhlík, křemík, ...). Extrémně rychlým ochlazením z kapalně fáze lze dosáhnout potlačení krystalizace a vytvořit strukturu látky, která je sklovitá. Z feromagnetických kovů lze vyrobit extrémně magneticky měkké materiály, které se používají jako náhrada Fe-Si plechů v transformátorech, motorech a také na magnetofonové hlavy. Kovové sklo s obchodním názvem Metglas 2705M (Co, B, Fe, Mo, Ni, Si) je slitina, která vykazuje téměř nulový koeficient magnetostrikce a vysokou permeabilitu. Používá se například pro výrobu jader vysokofrekvenčních transformátorů a magnetických senzorů. [22, 23]

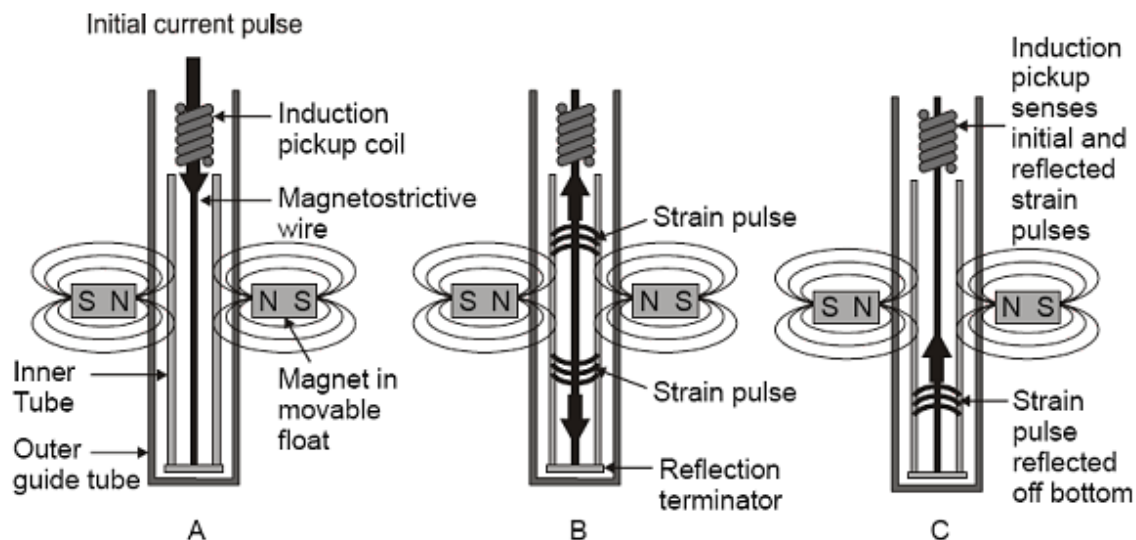
2.5 Použití magnetostrikčních materiálů

Magnetostrikční materiály lze využívat jako snímače vzdálenosti v náročných podmínkách, snímače síly a jako budiče ultrazvuku. Lze pomocí nich také reprodukovat hudbu či svařovat různé materiály. [1, 24, 25, 26]

2.5.1 Magnetostrikční snímač vzdálenosti

V automatizaci je často potřeba spojitě zjišťovat polohu objektů od zadaného vztažného bodu. Starší metody snímání (pomocí přesných potenciometrů) mají nedostatky v tom, že se jejich části mechanicky opotřebovávají a také mohou po čase způsobit chybu v měření. Proto se v současné době dává přednost bezkontaktnímu zjišťování polohy. Pro takovéto snímání se využívají magnetostrikční senzory, které určují polohu kombinací magnetomechanických jevů ve feromagnetickém materiálu a měřením doby šíření ultrazvukové vlny.

Princip vychází z magnetostrikčního (Wiedemanova) a magnetoelastického (Villariho) jevu. Wiedemanův jev lze vysvětlit při průchodu elektrického proudu skrz dlouhou a tenkou feromagnetickou tyč. Při současném umístění tyče v podélném magnetickém poli se namáhá krutem. Děj, kdy se mění magnetické vlastnosti tyče (např. permeabilita), který je způsoben její deformací v podélném směru, se nazývá Villariho jev. [24, 27]



Obr. 2-4 Funkce magnetostrikčního lineárního snímače-zleva vyslání budícího pulzu (A), vytvoření mechanické vlny (B), detekce odražené vlny [28]

Základními prvky snímače jsou feromagnetický vlnovod tvaru tyče, který vede ultrazvukovou vlnu a permanentní magnet, který je svázán se sledovaným objektem, a který vytváří podélné magnetické pole. Princip je znázorněn na Obr. 2-4. Vlnovodem se při měření vysílají krátké proudové impulsy. Ty generují magnetické pole radiálně působící na vlnovod, které se šíří spolu s impulsy vlnovodem rychlostí světla. V místě setkání obou polí dojde podle Wiedemanova jevu k mechanické deformaci vlnovodu, čímž vznikne mechanický torzní impuls šířící se jako ultrazvuková vlna k oběma koncům vlnovodu. Na jeho volném konci je utlumen tlumícím obvodem. Na druhém konci je umístěn měnič torzních impulsů skládající se z magnetostrikčního kovového pásku spojeného s vlnovodem, ze snímací cívky a z permanentního magnetu. Villariho jev příchodem torzní vlny způsobí změnu permeability pásku, čímž se ve snímací cívce naindukují elektrický impulz. Neboť se vlna šíří vlnovodem konstantní ultrazvukovou rychlostí, lze vzdálenost měřeného objektu vypočítat. Ukázky snímačů vzdálenosti jsou na Obr. 2-5. [24, 27]



Obr. 2-5 Magnetostrikční snímač vzdálenosti-vlevo snímač firmy Gefran [29], vpravo snímač firmy Regal [28]

Bezdotykové snímání vylučuje mechanické opotřebení a šum. V praxi lze využívat snímač i s více magnety. Vyrábějí se snímače v tyčovém provedení pro vzdálenosti až 7600 mm přičemž lze dosáhnout rozlišení až 1 μm . Výhoda je, že snímače nepotřebují žádné kalibrace. Používají se všude, kde potřebujeme v nepříznivých podmínkách měřit polohu objektu např. válcovací stolice, lisy, tlakové licí stroje, dávkovací zařízení, tunelových strojích nebo také v hydraulických systémech. [24, 30]

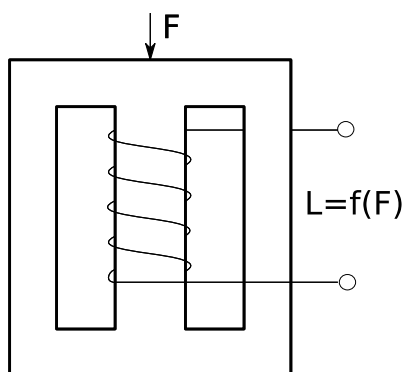
2.5.2 Magnetostrikční snímač síly

Ke snímání síly lze využít změn magnetických vlastností feromagnetik. Tento snímač využívá změny mechanického napětí působícího na materiál, čímž se mění jeho permeabilita. Snímač je vytvořen uzavřeným magnetickým obvodem s jednou či více cívkami. Působením síly na magnetický obvod se mění permeabilita μ materiálu. Tím se mění i magnetický odpor obvodu (reluktance) R_m , následně také indukčnost L , a tak i její impedance. Platí následující vztahy [31]

$$R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l_{FE}}{S_{FE}}, \quad (8)$$

$$L = \frac{N^2}{R_m}, \quad (9)$$

kde R_m je magnetický odpor, l_{FE} je délka železa, S_{FE} je průřez železa, L je indukčnost cívky, N je počet závitů.



Obr. 2-6 Magnetostrikční snímač síly [31]

Pro takovéto snímače je vhodné použít materiály s velkou permeabilitou a s malou indukcí nasycení B_s . Nejčastěji se používají permalloye. Tyto snímače dobře pracují při velkých silách (cca MN). Příklad snímače síly je zobrazen na Obr. 2-6. [31]

2.5.3 Ultrazvukové reproduktory

Feonic PLC je společnost, sídlící ve Velké Británii, která vyrábí audioproducty z magnetostrikčních materiálů, které byly původně vyvinuté pro podmořské ultrazvukové aplikace. V případě audio reproduktorů lze vyvinout celkem velkou mechanickou sílu (vibrace) pomocí relativně malého příkonu. Zvuk se vytváří rozkmitáním povrchu materiálu a mění ho v kvalitní širokopásmové reproduktory. Současné produkty jsou určeny pro akustické i ultrazvukové aplikace. Další budoucí vývoj se ubírá směrem přenosu vysokofrekvenčních signálů do mobilních telefonů a použitím ve zdravotnictví. [32]



Obr. 2-7 Reproduktor využívající magnetostriktci [32]

Výrobky se dají použít na tzv. whispering window (v překladu „šeptající okno,,). Tento přístroj, viz Obr. 2-7, lze jednoduše nalepit na okenní výlohu v jakémkoliv obchodě. Následně k němu přivedeme zvukový signál pomocí elektrických vodičů. Díky magnetostrikčnímu jevu se elektrický signál převede na mechanický ve formě vibrací, kterou jsou slyšitelné a mohou přitáhnout větší pozornost potenciálních zákazníků. Další aplikace tohoto výrobku je například použití jako domácího audio zařízení, vodotěsných reproduktorů a podobných aplikací. [32]

2.5.4 Magnetostrikční mikroaktuátory

Magnetostrikční aktuátor s Si nosníkem obsahuje Si nosník (tloušťka 50 μm , 20 mm délka), na kterém je naprášená vrstva magnetostrikčního materiálu (10 μm). Pracuje jako převodník velikosti magnetického pole na deformaci nosníku. Podélné působení magnetické indukce na magnetostrikční vrstvu způsobí deformaci (obyč nosníku). Výchylka je při těchto rozměrech asi 230 μm při (indukce 50 mT). Používané materiály jsou SmFe₂ (negativní magnetostrikce), TbFe nebo Terfenol-D (pozitivní magnetostrikce). Aktuátor může pracovat s kmitočtem až 500 Hz (nedojde k degradaci po méně než 10⁷ cyklech). [26]

2.5.5 Magnetostrikční budiče ultrazvuku

Ultrazvukové měniče jsou zdrojem ultrazvukové energie. Lze u nich rovněž využívat magnetostrikční vlastností materiálů. Princip spočívá v přeměně elektrické energie na energii mechanickou s využitím Jouleova jevu. Změna rozměrů je závislá na použitém materiálu, způsobu zpracování a na pracovní teplotě. Nejčastěji používanými materiály jsou nikl a kobalt, dále permalloy a permendur a také ferity, které se vyznačují zanedbatelnými ztrátami. Vyrábí se ve tvaru tyčinek. Měníče pracují v relativně úzkém frekvenčním pásmu od 16 kHz do 100 kHz, což je jejich nevýhoda spolu se závislostí na teplotě a mechanické kvalitě. [25]

Měníče mohou mít různé jiné tvary. Nejjednodušší typ je tyč z magnetostrikčního materiálu ovinutá budícím vinutím. Jestliže bude vinutím protékat proud s určitou frekvencí, vznikne v tyči pnutí, které se bude projevovat podélným kmitáním tyče. Je možné také měnič předmagnetizovat a nastavit tak pracovní bod měniče do lineární části, čímž získáme větší amplitudu deformace. Dalším typem mohou být tzv. okénkové měniče. Jsou složeny ze dvou tyčí, které jsou na obou koncích spojeny. Na obou tyčích jsou navinuté budící cívky, které tvoří okénko. Takto můžeme generovat ultrazvukové signály. Pro větší výkon poskládáme více tyčí vedle sebe. [33]

2.5.6 Ultrazvukové svařování

Ultrazvukové svařování je technika, která využívá vysokofrekvenční mechanické kmitání pro vytvoření spoje. Zdroj kmitání obsahuje ultrazvukový měnič, jehož vinutí je napájeno z elektronického vysokofrekvenčního generátoru proudu (10 až 100 kHz). Dva svařované materiály jsou k sobě přitlačeny tak, že jeden materiál je pevně fixován a druhý je rozkmitán budičem ultrazvuku. Ten se skládá z magnetostrikčního měniče (Fe + Ni, Fe + Co) za kterým je trychtýřovitý vlnovod, který zesílí amplitudu kmitů. Mění se tedy elektrické vlny vysoké frekvence na mechanické vlny vysoké frekvence. Na konci vlnovodu je umístěná tzv. sonotroda, která přenáší kmity do místa spoje. Na rozhraní spojovaných materiálů vzniká pružná deformace a zároveň celkem malé zvýšení teploty. Optimální amplituda mechanických kmitů leží mezi 5 a 35 mikrometry. Lze svařovat materiály pouze omezené tloušťky kvůli útlumu mechanického vlnění. Ultrazvukové svařování je v elektrotechnice využíváno například ke sváření měděného lanka na upevňovacím profilu (jističe), měděné cívky na měděném plechu (domácí spotřebiče), ale lze svařovat také plasty. [34]

3 MĚŘENÍ MAGNETOSTRIKCE

Dalším úkolem zadání bakalářské práce bylo změřit magnetostriktu. Zjistil jsem, že v laboratořích katedry technologií a měření se nachází přístroj TMA Q400 firmy TA Instruments, viz Obr. 3-1, využívající termomechanickou analýzu a s kterým by bylo možné magnetostriktu změřit. Hlavním důvodem, proč jsem si vybral tuto metodu měření byla její přesnost, ale také grafické znázornění aktuálně měřených dat.

3.1 Termomechanická analýza

Termomechanická analýza (TMA) je technika, při které se analyzují fyzikální a chemické změny, které vznikají ve zkoumané látce působením teploty. Patří pod skupinu termických analýz, do kterých patří také např. termogravimetrie (TG), diferenční termická analýza (DTA), apod. Používají se jak v oblasti chemie, tak i v elektrotechnické diagnostice a řadě dalších odvětví. S jejich pomocí se dají určovat např: fázové přechody, mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů a oxidační stabilita .
[4]



Obr. 3-1 Thermomechanical analyzer Q400 [35]

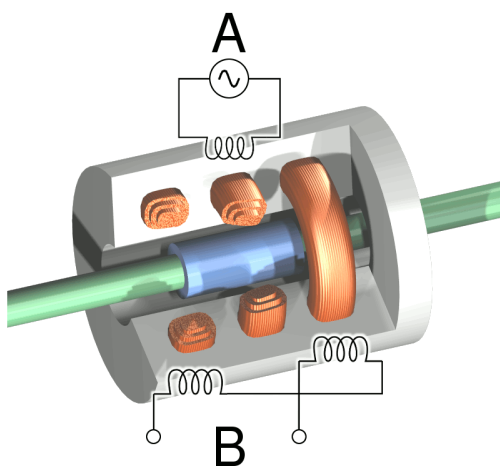
3.1.1 Princip TMA

Princip termomechanické analýzy spočívá v měření deformace zkoumaného vzorku látky, který je umístěn mezi měřicím sondou a statickou podstavou a mezi nimiž je udržována konstantní neoscilující síla. To vše probíhá pod malou indukční pecí, která automaticky řídí teplotu. Dle typu měření lze využívat různé druhy měřicích sond např. expanzní, makroexpanzní, penetrační, atd. [36]

3.1.2 Uspořádání aparatury TMA

Přístroj je vybaven indukčním snímačem polohy, který je tvořen transformátorem složeným z tří toroidních cívek. Primární vinutí tohoto transformátoru je navinuto na prostřední části cívky, sekundární vinutí je rozděleno na dvě části a zaujímá pozici na krajích snímače. Feromagnetické jádro transformátoru je mechanicky spojeno s měřicí sondou a nefixované s cívkami.

Primárním vinutím transformátoru protéká střídavý proud, který v sekundárním vinutí indukuje napětí. Pohybem jádra se mění vzájemná indukčnost cívek sekundárního vinutí. Jelikož jsou sekundární vinutí v diferenciálním uspořádání, jak je naznačeno na Obr. 3-2 v centrální poloze je výstupní napětí nulové. Při vychýlení, ať už na jednu či druhou stranu, se v jednom vinutí indukované napětí zvětšuje, kdežto v druhém zmenšuje. Dále se při výchylce mění fázový posun napětí primárního a sekundárního vinutí, který určuje směr posunu. Výsledné indukované napětí je tedy úměrné výchylce sondy. [36]



Obr. 3-2 Indukční snímač polohy [37]

Na feromagnetické jádro můžeme lehce připojit jakoukoliv z měřících sond. Ty jsou vyrobené většinou z křemenného skla. Konec sondy dosedá na vzorek a ta ho přitlačuje zadanou silou. Velikost síly se může pohybovat od 0,001 N do 2 N. U sondy je také samozřejmě umístěn termočlánek k snímání teploty při ohřevu. Citlivost přístroje je 15 nm a přesnost měření 0,1 %. [36]

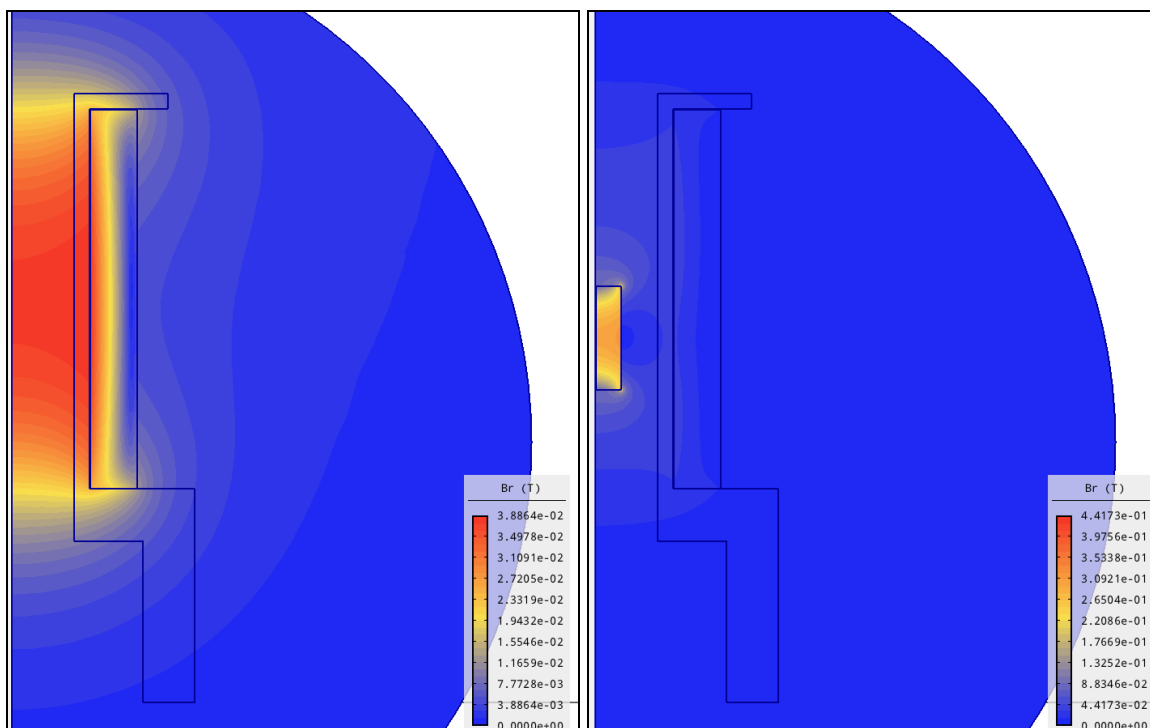
3.2 Zhotovení měřícího přípravku

Následně bylo nutné vyrobit přípravek, s jehož pomocí změřím magnetostrikci. Bylo nutné vybudit magnetické pole. Rozhodl jsem se tedy vyrobit cívku, kterou nasadím na měřící sondu s feromagnetickým vzorkem.

3.2.1 Návrh cívky

Vycházel jsem z rozměrů přístroje pro termomechanickou analýzu. Navrhl jsem uspořádání celé cívky a hlavně průměru otvoru na vzorek tak, abych při nasazování přípravku přes sondu a termočlánek minimalizoval riziko poškození. Výška cívky by měla být v poměru s průměrem mnohem větší, aby se vytvářelo co nejvíce homogenní pole v místě vzorku.

Otvor pro usazení cívky jsem navrhl tak, aby byla cívka co nejpevněji držena. Musela mít také uspořádání, aby svým magnetickým polem nemohla zásadně ovlivnit funkci indukčního snímače polohy. Cívku jsem si také nasimuloval v programu Agros2D, viz Obr. 3-3. Jako vstupní data simulace jsem použil celkový proud 2560 A (512 závitů a proud v závitu 5 A), relativní permeabilitu feromagnetika 200 a rozměry dle svého návrhu.



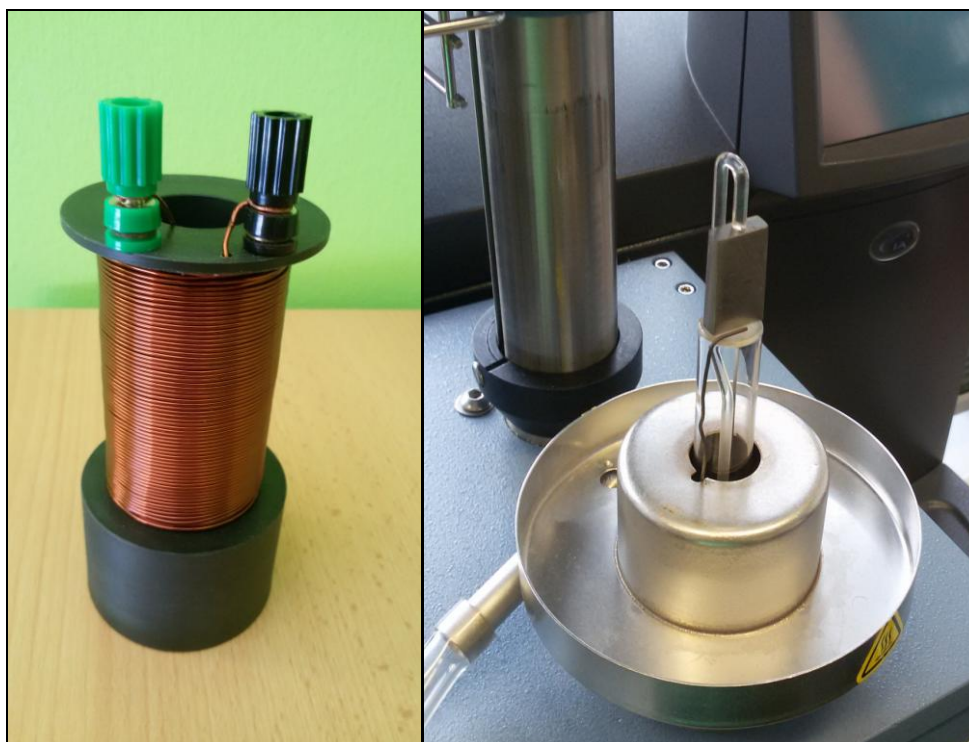
Obr. 3-3 Simulace v programu Agros2D a) bez feromagnetického materiálu b) s feromagnetickým vzorkem

3.2.2 Výroba cívky

Držák cívky jsem si nechal vysoustružit. Jako materiál jsem zakoupil černý silon, který se lehce obrábí a je pevný. Navinutí cívky bylo vcelku náročné. První pokus o navinutí skončil nedostatečně staženými závitů cívky. Následně jsme cívku začali vinout ve dvou, což způsobilo značné zlepšení kvality závitů. Celkem bylo navinuto 8 vrstev po 64 závitěch, tedy celkem 512 závitů. Použil jsem lakovaný měděný vodič s průřezem $0,75 \text{ mm}^2$. Konce cívky jsem vyvedl do dvou přístrojových dutinek pro připojení vodičů. Navinutá cívka je vidět na Obr. 3-4 vlevo.

3.3 Příprava feromagnetických vzorků

Dlouhou dobu jsem nemohl získat odpovídající feromagnetické materiály. Postupem času jsem nakonec sehnal vzorek železa, niklu a dokonce i kobaltu. Vzorky bylo potřeba dosti opracovat a začistit, aby byly alespoň dvě strany relativně rovnoběžné a aby se svými rozměry daly umístit do aparatury. Maximální možná výška vzorku činí 26 mm. Průměr skleněné trubice, na kterou se staví měřený vzorek, je 10 mm. Feromagnetické vzorky a způsob uchycení vzorků pod sondu je zobrazen v Příloze D tohoto dokumentu a na Obr. 3-4 vpravo.

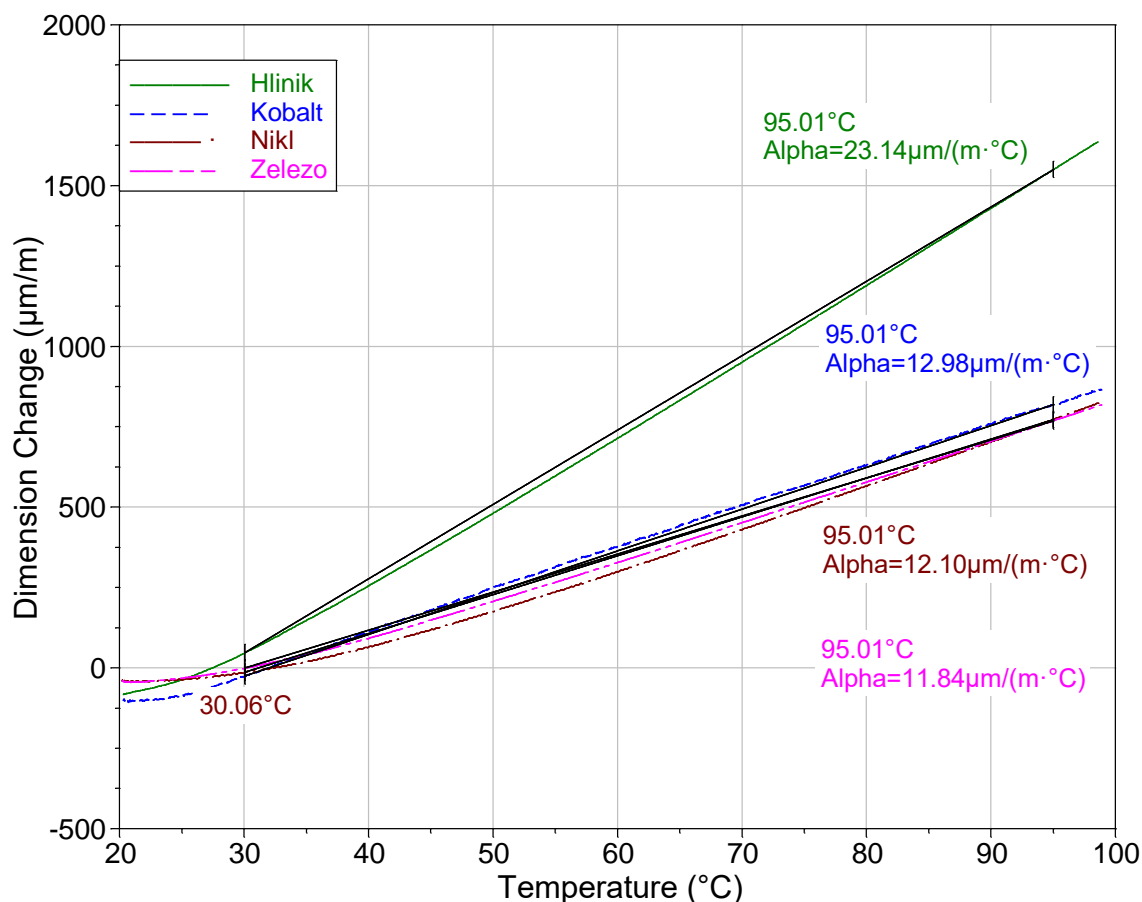


Obr. 3-4 Vlevo navinutá cívka a vpravo ukázka uchycení vzorku

3.4 Teplotní roztažnost

Při měření se objevily problémy se zahříváním cívky díky Jouleovým ztrátám ve vinutí hlavně při pomalejším měření a odečítání více hodnot. Při zahřívání, způsobeného přestupem tepla od cívky, měnil vzorek svoje rozměry nejen magnetostrikcí, ale také tepelnou roztažností. Pokud jsem chtěl měřit vliv čisté magnetostrikce, musel jsem tepelnou roztažnost nějakým způsobem eliminovat. Nevytvářel jsem chlazení, ale nechal jsem si určit koeficient lineární tepelné roztažnosti CTE (coefficient of thermal expansion) pro každý vzorek pomocí TMA.

Měření probíhalo tak, že se vzorek umístil do aparatury a probíhalo postupné ohřívání vzorku. Pro mé měření stačily pracovní teploty od 20 °C do 60 °C. Z grafické závislosti prodloužení vzorku na teplotě jsem stanovil tento koeficient. Při prvních měřeních byl také problém s tím, že při vyšším budícím proudu cívky se vzorky začaly přitahovat k vnitřní stěně cívky. To jsem vyřešil tak, že jsem zvýšil přítlačnou sílu sondy na vzorek na 0,1 N. Při této síle jsem také musel měřit koeficient roztažnosti. Při jiné přítlačné síle by byla hodnota koeficientu jiná.



Obr. 3-5 Vyhodnocení CTE provedené na feromagnetických vzorcích na přístroji Q400

Tabulkové hodnoty součinitelů teplotní délkové roztažnosti jsou pro hliník $24 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$, nikl $13 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$, kobalt $12 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$, železo $12 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$. Z grafu na Obr. 3-5 je patrné, že hodnoty tepelné roztažnosti se více méně shodují s tabulkovými hodnotami pro jednotlivé látky. [38]

3.5 Realizace měření

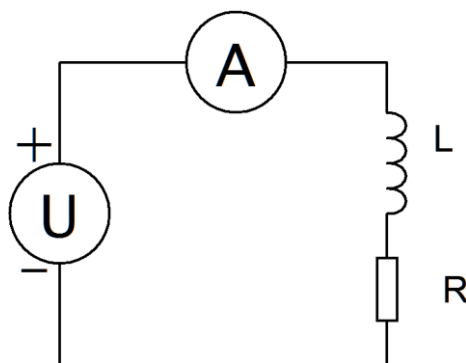
Pro realizaci samotného měření, které je znázorněné na Obr. 3-6, jsem používal zdroj stejnosměrného napětí s proudovým omezením, digitální ampérmetr a měřící cívku. Nejprve jsem umístil vzorek do stojánku co nejvíce do středu, aby byl umístěn symetricky. Poté jsem nechal sjet sondu až ke vzorku. Používal jsem expanzní typ sondy. Indukční pec je při tom umístěna na straně. Na vzorek jsem poté umístil měřící přípravek a zapojil obvod. Pokud chceme minimalizovat vliv teplotní roztažnosti, musíme měřit co možná nejrychleji.



Obr. 3-6 Realizace měření magnetostrikce

3.5.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení, viz Obr. 3-7, které bylo použité pro měření magnetostrikce, je velmi jednoduché. Skládá se ze zdroje stejnosměrného napětí, ampérmetru, indukčnosti a rezistoru.

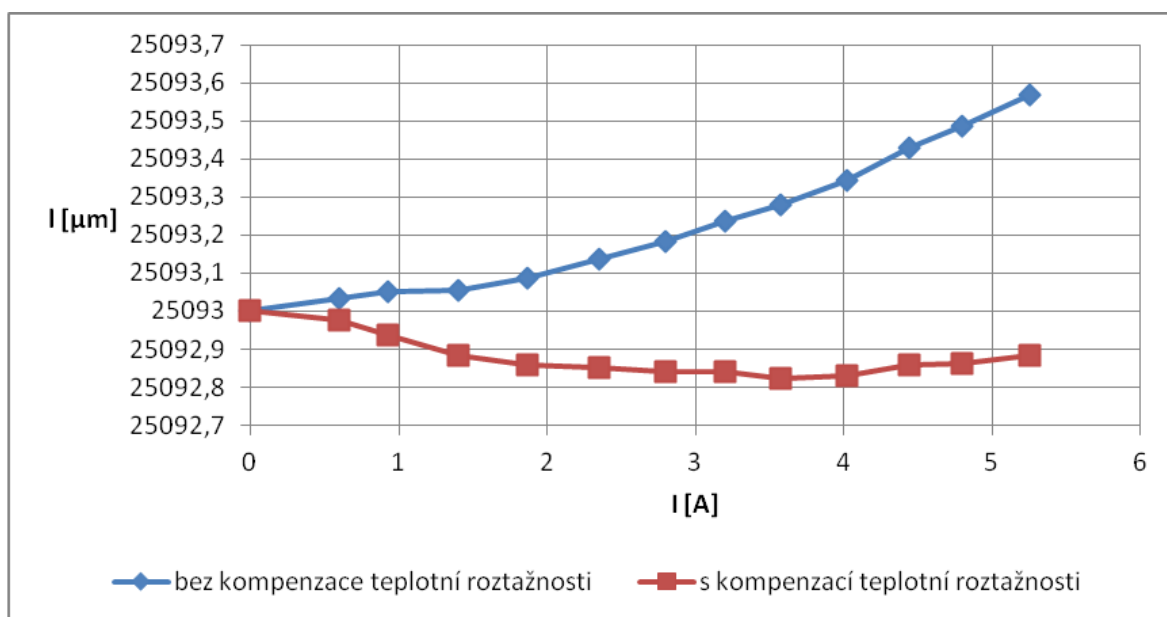


Obr. 3-7 Schéma zapojení pro měření magnetostrikce

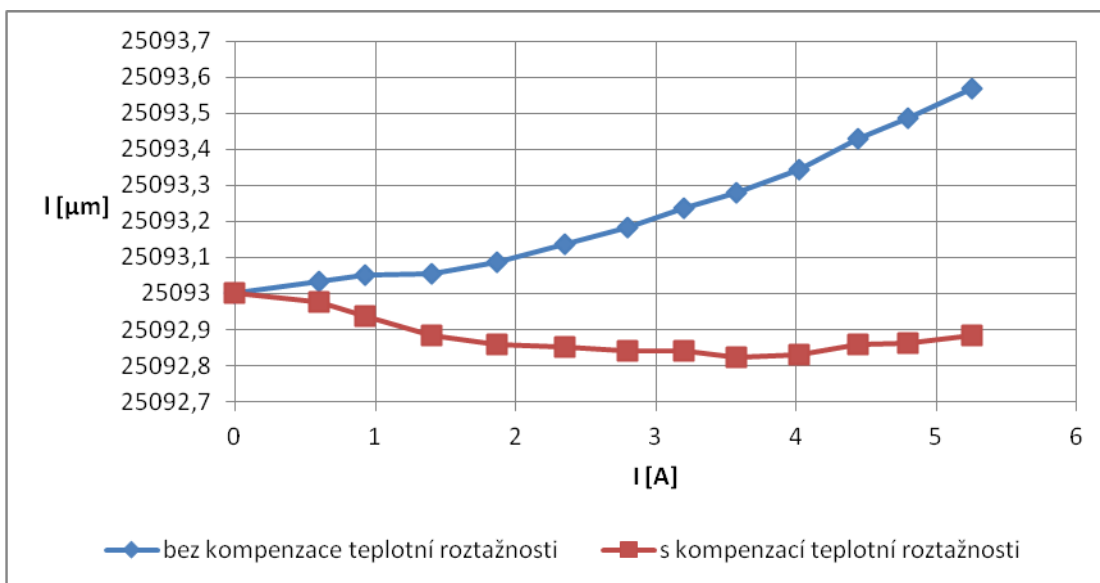
3.5.2 Naměřené hodnoty a grafické závislosti

Naměřené hodnoty jsou zpracovány v tabulkách, které jsou umístěné v přílohách tohoto dokumentu. Proměnná I vyjadřuje protékající proud, l_0 vyjadřuje velikost vzorku naměřenou pomocí přístroje Q400. Proměnná l_M vyjadřuje kompenzaci vlivu teplotní roztažnosti. Dále byla měřena teplota T .

Z Obr. 3-8 je patrné, že při měření magnetostrikce železného vzorku se materiál délkově prodlužoval. Během toho zvýšil svoji teplotu o 2,3 °C, což je téměř zanedbatelná hodnota, nicméně při kompenzaci teplotní roztažnosti vzorku se výsledky měření liší. Najednou vzorek vykazuje při zvětšování proudu (intenzity magnetického pole) jeho zkracování. Železný vzorek má tedy záporný koeficient magnetostrikce, čímž se nám potvrzují teoretické předpoklady. Při kompenzaci teplotní roztažnosti jednotlivých vzorků jsem předpokládal lineární nárůst jejich teploty a hodnotu koeficientu délkové roztažnosti dle tabulkových hodnot (naměřené se téměř shodovaly). Vzorek železa se tedy zkrátil o dvanáct setin mikrometru, což je malá hodnota. Stejně děje vykazoval vzorek při opačném působení magnetického pole jak je vidět na Obr. 3-9. Koeficient magnetostrikce železa vyšel průměrně okolo hodnoty $-7 \cdot 10^{-6}$.

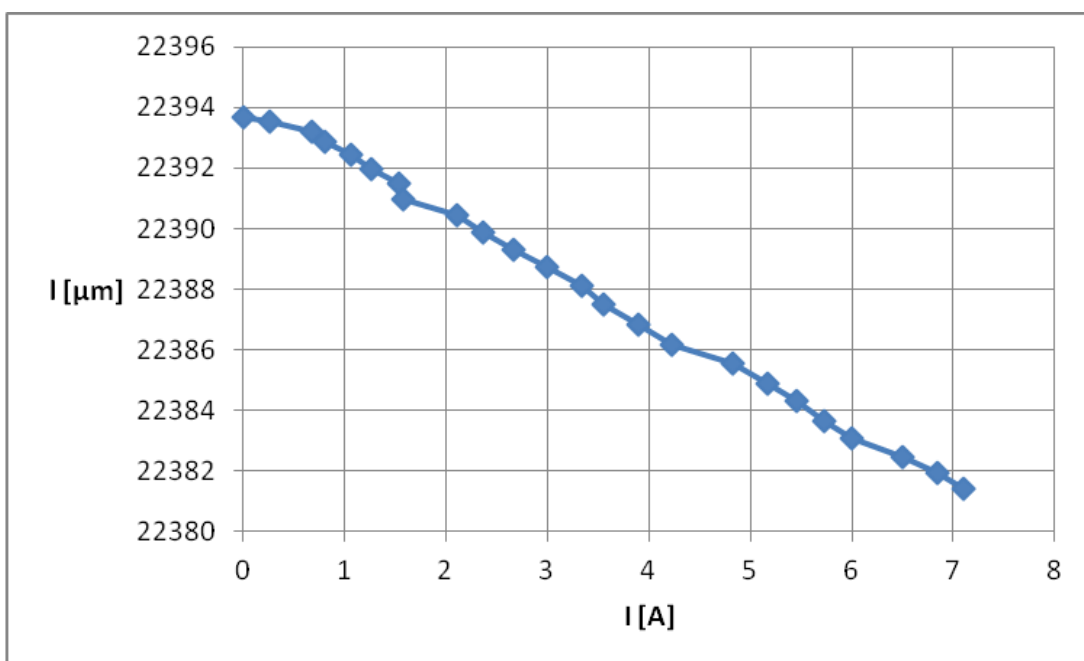


Obr. 3-8 Grafická závislost změny rozměrů vzorku železa v magnetickém poli v závislosti na proudu protékajícím cívkou



Obr. 3-9 Grafická závislost změny rozměrů vzorku železa v opačném magnetickém poli v závislosti na proudu protékajícím cívkou

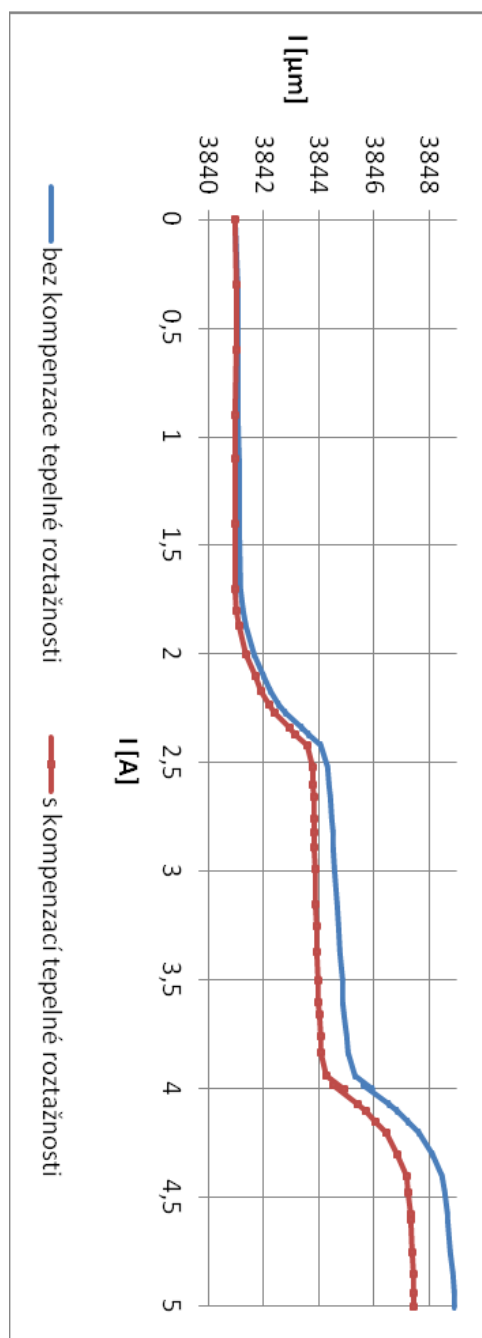
Dalším měřeným vzorkem, na kterém už byly velice znatelné účinky magnetického pole, byl nikl. Jak je vidět na Obr. 3-10, velikost niklu se při zvyšování magnetického pole zmešovala. Je to způsobeno rovněž záporným koeficientem magnetostrikce, který v tomto případě vyšel $-494 \cdot 10^{-3}$. Vzorek se opět jen nepatrně zahřál (pouze o 3 °C). Vliv teplotní kompenzace není v grafu zobrazen, jelikož byl nepatrný. Rozměry niklu tedy rapidně klesaly. Ve výsledku se vzorek zmenšil o 11,07 mikrometru.



Obr. 3-10 Grafická závislost změny rozměrů vzorku niklu v magnetickém poli v závislosti na proudu protékajícím cívkou

Měření na kobaltovém vzorku bylo nesmírně zajímavé. Jeho teplota rychle narůstala a během měření se zvýšila o 30°C. Takto velká změna by měla vyvolat mnohem větší teplotní roztažnost, než u niklového vzorku, ale nestalo se tak. Bylo to způsobené velikostí kobaltového vzorku, která byla jen něco okolo 4 milimetrů oproti 22 milimetrů dlouhému vzorku niklu. Vzorek by měl dle teoretických předpokladů také zmenšovat svoji velikost díky zápornému koeficientu magnetostricke. Nejenže toto nesplňoval, ale také při určitých intenzitách magnetického pole vykazoval zajímavé přechody viz Obr. 3.11.

Do velikosti napájecího proudu 1,7 A nebyly znatelné téměř žádné změny. Poté přišla větší změna rozměrů materiálu při stejných změnách proudu. Mezi hodnotami 2,5 a 3,8 A se tento gradient snížil a linearizoval tuto část jako na počátku. Při dosažení 4 A se změna délky vzorku opět zvětšovala neúměrně při zvyšování magnetického pole. Nejprve jsme si mysleli, že jde o chybu (špatné ustavení měření, nerovnosti povrchu apod.), ale ukázalo se, že při prudkém snižování a zvyšování napájecího proudu průběh kopíroval tu samou křivku. Změny rozměrů materiálu reagovaly opravdu téměř okamžitě.



Obr. 3-11 Grafická závislost změny rozměrů vzorku kobaltu v magnetickém poli v závislosti na proudu protékajícím cívko

4 ZÁVĚR

V první části této práce jsem uvedl magnetické materiály, jejich dělení a vlastnosti k získání základní představy o chování magnetických látek. Dále jsem provedl rešerši magnetostrikce, kde byl vysvětlen magnetostrikční jev spolu s uvedením klasických (Fe, Ni, Co) a dále speciálních magnetostrikčních materiálů jako Terfenol-D, Galfenol, Alfenol a kovová skla. Magnetostrikční materiály se používají hlavně jako snímače vzdálenosti pro velmi přesná měření, jako budiče ultrazvuku při ultrazvukovém svařování a reprodukci zvuku. Také lze materiály využívat jako různé snímače síly či mikroaktuátory.

Při realizaci měření magnetostrikce jsem k vybuzení magnetického pole použil vlastnoručně vyrobenou a navinutou cívku. Použitím permanentního magnetu by nebylo možné regulovat velikosti magnetického pole, nezaznamenal bych spojitou změnu rozměrů a také by byl problém při ustavení magnetu. Velikost cívky byla omezena vlastními rozměry přístroje Q400 pro termomechanickou analýzu kvůli nasunutí přípravku. Nebylo také možné vytvářet velké magnetické pole, jelikož by mohla být narušena funkce samotného přístroje Q400. Proto bylo navinuto 8 vrstev po 64 závitěch (512 závitů). Maximální napájecí napětí bylo takové, aby cívkou protékal takový proud, aby nebyl vodič o průřezu $0,75 \text{ mm}^2$ dlouhodobě přetížen. Krátkodobě jsem vodič přetěžoval proudem až 7 ampér, abych dosáhl co největších intenzit magnetického pole. Ovšem tím, že jsem se s intenzitou magnetického pole nedostal do stavu nasycení, nebylo možné změřit koeficient nasycené magnetostrikce.

Velkým problémem bylo zahřívání celého přípravku. Důvodem byl špatný odvod ztrátového tepla jak z vnitřního prostoru cívky, tak z feromagnetického materiálu. Ideální měření by probíhalo při konstantní okolní teplotě. Snížení vlivu teploty by bylo možné například přidáním externího chlazení.

Změřil jsem teplotní roztažnost jednotlivých feromagnetických vzorků, abych mohl teoreticky eliminovat její vliv při měření magnetostrikce. Tato eliminace však není přesná, jelikož tok tepelné energie uvnitř přípravku je těžce popsitelný. Proto jsem provedl pouze lineární korekci teplotní roztažnosti.

Měření magnetostrikce bylo vcelku úspěšné. U všech materiálů jsem zaznamenal okamžitou odezvu změny délky při změně napájecího napětí. Železný vzorek změnil svoje rozměry jen nepatrně (zmenšil se o 12 setin mikrometru). Mnohem větší zmenšení 11 mikrometrů bylo zaznamenáno u niklu. Magnetostrikce u železa byla asi $-7 \cdot 10^{-6}$, u niklu vyšla $-0,494 \cdot 10^{-3}$ což je velká hodnota. Je proto možné, že nikl nebyl čistý a měl sobě další prvky, které zvýšily jeho magnetostrikci. Změna rozměrů (zmenšení) železného a niklového vzorku byla dle teoretických předpokladů správná. U kobaltu tomu tak nebylo. To bylo nejspíše způsobené tím, že vzorek nebyl naprosto čistý. Mohla to být slitina železa a kobaltu přičemž při zvýšení podílu železa se může koeficient magnetostrikce značně změnit. Kobaltový vzorek se zvětšil a to o téměř 7 mikrometrů. Jeho magnetostrikce pak vyšla $1,683 \cdot 10^{-3}$, což je 3 krát větší hodnota než u niklu. Z měření je patrné, že fyzikální jev magnetostrikce je velice složitá záležitost.

V mé bakalářské práci jsem splnil veškeré body dle zadání. Toto měření lze bez problémů aplikovat na vzorky materiálů s omezenými rozměry při konstantní teplotě tak, aby se nezanášela chyba měření díky tepelné roztažnosti. V budoucnu by bylo možné mnohonásobné zefektivnění měření a to vytvořením programu v počítači, který by byl synchronizován jak s regulací napájecího napětí, tak s indukčním snímačem polohy. Díky tomuto by bylo možné rychlé měření s vytvořením většího magnetického pole, při které by se aparatura neohřála a vliv magnetostrikce by byl patrnější. Také by bylo možné ještě zvětšit přípravek pro cívku, zvýšit počet závitů a tím zvětšit magnetické pole. Musel by být ovšem ošetřen negativní vliv na přístroj Q400 a jeho elektroniku.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [2] Magnetostriction. *Etrema*. [online]. 3.2.2016 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.etrema.com/magnetostriction/>
- [3] HASSDENTEUFEL, Josef a Karel KVĚT. *Elektrotechnické materiály*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967.
- [4] Mentlík, Václav. *Strukturální analýzy aplikovatelné v diagnostice elektrických zařízení*. (přednáška) Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2016-04-05
- [5] OLDŘICH LEPIL, Milan Bednařík. *Fyzika pro střední školy II*. Dotisk 3., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2001. ISBN 9788071961857.
- [6] *Úvod do fyziky pevných látek: Magnetické vlastnosti látek* [online]. 109-128 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/svpl/fpl3.pdf>
- [7] *Elektrotechnické materiály*. I. Plzeň: ZČU Plzeň - ediční středisko, 1995. ISBN 80-7082-227-9.
- [8] LIPTÁK, Jan a Josef SEDLÁČEK. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. I. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03191-9.
- [9] KUČEROVÁ, Eva. *Základy magnetismu*. (přednáška) Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2014-03-26
- [10] DUBSKÝ, Jan, *Elektrotechnické materiály (Pro obor technická kybernetika)*, Plzeň: Editační středisko VŠSE, 1972
- [11] Encyklopedie fyziky: Krystalické a amorfní látky. *Fyzika.jreichl* [online]. 2012 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/622-krystalicke-a-amorfni-latky>
- [12] Elektrotechnika 1: Magnetické obvody. *Utee.feec.vutbr* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: http://www.utee.feec.vutbr.cz/files/predmety/BEL1/Multimed_uc/BEL1_blok6.pdf
- [13] Rooya: Měděný drát. *Korálkárna* [online]. [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: <http://www.rooya.cz/?zacatek=360>
- [14] Stavební materiály: Hliník a dural. *Dům, stavba, zahrada* [online]. [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: http://www.rc-modely-hruby.cz/obchod/stavebni_materialy/hlinik_a_dural/--p0/
- [15] Encyklopedie fyziky: Krystalické a amorfní látky. *Fyzika.jreichl* [online]. 2012 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <https://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magnetické-vlastnosti-látek>
- [16] Ferity. *TEM electronic components* [online]. [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: http://www.tme.eu/cz/pages/New_Product:feritova-odrusovaci-jadra-firmy-richco.html
- [17] Magnetostriction. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetostriction>
- [18] KVÍTEK, Emil. *Materiály pro elektrotechniku* [online]. , 1-64 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: file:///D:/Stahovan%C3%AD/Skripta_materialy.pdf

- [19] Permendur. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Permendur>
- [20] *Tensile properties of binary and alloyed Galfenol* [online]. [cit. 2016-05-24]. DOI: 10.1007/s10853-015-9045-6. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/277025944_Tensile_properties_of_binary_and_alloyed_Galfenol
- [21] Alperm. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Alperm>
- [22] *Kovová skla* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NEkM%20Dad/3kovskla.pdf. Technická univerzita v Liberci.
- [23] POLANSKÝ, Radek. *Soustavy látek a jejich fázové složení*. (přednáška) Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2016-02-03
- [24] KABEŠ, Karel . *Magnetostrikční snímače vzdálenosti*. *Automa : časopis pro automatizační techniku* [online]. 2007, 04, [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=34229
- [25] KUDĚLKA, Pavel. *Virtuální přístroj pro měření vlastností ultrazvukových měničů* [online]. Brno, 2009. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18424. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Radim Kolář, Ph.D.
- [26] *Mikroaktuátory s magnetickými principy: Magnetostrikční aktuátory* [online]. , 1-31 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X348MS/prednasky/11%20Magneticke%20mikroaktu%20tory.pdf>
- [27] *Magnetostriction: Basic physical elements*. *Mtssensors* [online]. 2001 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.mtssensors.com/fileadmin/media/pdfs/551019.pdf>
- [28] *Automatizace.hw: Magnetostrikční lineární snímače pohybu* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/magnetostrikcni-linearni-snimace-pohybu>
- [29] Měřicí a regulační technika: Magnetostrikční lineární snímač dráhy Gefran MK4A. *Bamas-Elektro* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.bamas-elektro.cz/bezkontaktni-linearni-snimace-drahy/554-magnetostrikcni-linearni-snimac-drahy-gefran-mk4a.html>
- [30] *3 principy dokonalých polohových senzorů ASM: Magnetostrikční polohové senzory* [online]. 2005, , 1-12 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.rem-technik.cz/pdf/ASM_senzory_cz.pdf
- [31] JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. *Technická měření* [online]. 1. Praha: ČVUT, 2000 [cit. 2016-05-25]. ISBN 80-01-02138-6. Dostupné z: [http://www.strojar.com/upload/skripta/notime/Technicka_mereni_\(OCR\).pdf](http://www.strojar.com/upload/skripta/notime/Technicka_mereni_(OCR).pdf)
- [32] Products. *Feonic* [online]. 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.feonic.com/>
- [33] BARTONÍK, Jan. *Možnosti bezdotykového měření vzdálenosti* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/25282/barton%20C3%ADk_2013_bp.pdf?sequence=1. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

- [34] *Ultratech*. [online]. 2016-05-23 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://ultratech.cz/ultrazvukove-aplikace/>
- [35] Thermomechanical analyzer. *Direct industry* [online]. [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/ta-instruments/product-38477-273569.html>
- [36] POLANSKÝ, Radek. *Teoretické a praktické aspekty termomechanické analýzy* [online]. , 1-12 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: www.elektrorevue.cz/file.php?id=200000214-e6c1de8b5b
- [37] Řez senzorem LDVT. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/LVDT#/media/File:LVDT.png>
- [38] Portál pro strojní konstruktéry: Koefficient lineární teplotní roztažnosti vybraných materiálů. *E-konstrukter* [online]. 2013 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/linearni-teplotni-roztaznost-mateialu>

Přílohy

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty magnetostrikce železného vzorku.

Příloha A-Železno

I [A]	l_0 [μm]	T [°C]	l_M [μm]	I [A]	l_0 [μm]	T [°C]	l_M [μm]
0	25093,00	23,7	25093,00	0	25095,77	28	25095,77
0,6	25093,04	23,9	25092,98	0,44	25095,81	28,2	25095,76
0,93	25093,05	24,1	25092,94	0,98	25095,83	28,3	25095,73
1,4	25093,06	24,3	25092,88	1,3	25095,85	28,5	25095,70
1,87	25093,09	24,5	25092,86	1,62	25095,86	28,7	25095,66
2,35	25093,14	24,7	25092,85	1,96	25095,90	28,8	25095,65
2,8	25093,18	24,9	25092,84	2,22	25095,91	29,0	25095,62
3,2	25093,24	25,0	25092,84	2,45	25095,95	29,2	25095,60
3,57	25093,28	25,2	25092,82	2,7	25095,97	29,3	25095,58
4,02	25093,34	25,4	25092,83	2,96	25096,01	29,5	25095,57
4,44	25093,43	25,6	25092,86	3,2	25096,04	29,7	25095,55
4,8	25093,49	25,8	25092,86	3,47	25096,10	29,8	25095,55
5,25	25093,57	26	25092,88	3,73	25096,14	30,0	25095,55
				4,05	25096,21	30,2	25095,57
				4,25	25096,25	30,3	25095,56
				4,43	25096,30	30,5	25095,56
				4,8	25096,38	30,7	25095,58
				5,07	25096,47	30,8	25095,63
				5,32	25096,57	31	25095,68

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty magnetostrikce niklového vzorku.

Příloha B-Nikl

I [A]	l_0 [μm]	T [°C]	l_M [μm]	I [A]	l_0 [μm]	T [°C]	l_M [μm]
0	22393,70	24,3	22393,70	3,34	22388,55	25,9	22388,12
0,26	22393,57	24,4	22393,53	3,55	22387,96	26,0	22387,49
0,68	22393,27	24,6	22393,19	3,9	22387,34	26,2	22386,84
0,8	22392,97	24,7	22392,86	4,23	22386,73	26,3	22386,18
1,06	22392,58	24,8	22392,44	4,83	22386,11	26,4	22385,53
1,26	22392,16	25,0	22391,98	5,17	22385,52	26,6	22384,91
1,53	22391,70	25,1	22391,48	5,45	22384,95	26,7	22384,30
1,58	22391,22	25,2	22390,97	5,73	22384,36	26,8	22383,67
2,11	22390,72	25,4	22390,43	6	22383,79	27,0	22383,07
2,37	22390,21	25,5	22389,88	6,5	22383,24	27,1	22382,48
2,66	22389,68	25,6	22389,32	6,85	22382,72	27,2	22381,92
3	22389,12	25,8	22388,73	7,1	22382,23	27,4	22381,40

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty magnetostrikce kobaltového vzorku.

Příloha C-Kobalt

I [A]	l_0 [μm]	T [°C]	l_M [μm]	I [A]	l_0 [μm]	T [°C]	l_M [μm]
0	3840,96	20,0	3840,96	3,15	3844,66	35,3	3843,90
0,3	3841,05	20,6	3841,02	3,25	3844,73	36,0	3843,93
0,6	3841,08	21,3	3841,02	3,37	3844,78	36,6	3843,95
0,9	3841,09	21,9	3840,99	3,5	3844,85	37,2	3843,99
1,1	3841,11	22,6	3840,98	3,6	3844,88	37,9	3843,99
1,4	3841,14	23,2	3840,98	3,66	3844,94	38,5	3844,02
1,7	3841,18	23,8	3840,99	3,76	3845,01	39,1	3844,06
1,8	3841,25	24,5	3841,03	3,83	3845,07	39,8	3844,08
1,87	3841,36	25,1	3841,11	3,94	3845,30	40,4	3844,28
2	3841,65	25,7	3841,36	4	3845,95	41,1	3844,90
2,1	3842,01	26,4	3841,69	3,98	3845,62	41,7	3844,54
2,17	3842,24	27,0	3841,89	4,07	3846,53	42,3	3845,42
2,23	3842,57	27,7	3842,19	4,1	3846,85	43,0	3845,70
2,27	3842,81	28,3	3842,40	4,15	3847,21	43,6	3846,03
2,34	3843,38	28,9	3842,93	4,2	3847,64	44,3	3846,43
2,37	3843,64	29,6	3843,16	4,3	3848,10	44,9	3846,86
2,42	3844,09	30,2	3843,58	4,4	3848,47	45,5	3847,20
2,52	3844,31	30,9	3843,77	4,48	3848,56	46,2	3847,26
2,6	3844,37	31,5	3843,80	4,58	3848,65	46,8	3847,31
2,66	3844,42	32,1	3843,82	4,6	3848,68	47,4	3847,31
2,76	3844,46	32,8	3843,82	4,75	3848,78	48,1	3847,38
2,82	3844,51	33,4	3843,84	4,85	3848,84	48,7	3847,41
2,89	3844,54	34,0	3843,84	4,94	3848,90	49,4	3847,44
2,99	3844,59	34,7	3843,86	5	3848,93	50,0	3847,43

Příloha D-Ukázka feromagnetických vzorků (železo, nikl a kobalt).

