

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Karol HILKO

Autoreferát dizertačnej práce

**Pokročilé metódy identifikácie magnetických vlastností
feromagnetických materiálov so zameraním na ich štrukturálnu
diagnostiku**

Na získanie titulu doktor („*Philosophiae doctor*“ - PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Meracia technika

Bratislava 2024

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Karol HILKO

Autoreferát dizertačnej práce

**Pokročilé metódy identifikácie magnetických vlastností
feromagnetických materiálov so zameraním na ich štruktúrnu
diagnostiku**

Na získanie titulu doktor („*Philosophiae doctor*“ - PhD.)
v doktorandskom študijnom programe: Meracia technika

Pracovisko:

Ústav elektrotechniky



Bratislava 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave elektrotechniky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Karol Hilko**
Ústav elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Vladimír Jančárik, PhD.**
Ústav elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Milan Smetana, PhD.**
Oddelenie biomedicínskeho inžinierstva
Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, UNIZA
Univerzitná 1, 010 26 Žilina

prof. Ing. Ivan Kneppo, DrSc.
Nové Sady 240, 951 24
dôchodca

Autoreferát bol rozoslaný dňa:.....

Obhajoba dizertačnej práce sa konala dňa:.....o.....h.

na Fakulte elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity,

adresa: Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

.....
prof. Ing. Vladimír Kutíš, PhD.
Dekan FEI STU v Bratislave

ABSTRAKT:

Kľúčové slová: nedeštruktívne testovanie, Barkhausenov efekt, magnetizmus, hysterézna slučka, Charpyho vzorka

Práca je zameraná na metódy nedeštruktívnej defektoskopie feromagnetických materiálov so zameraním na magnetické testovanie vybraných konštrukčných ocelí. Úvod práce je venovaný zhrnutiu teoretických poznatkov v danej oblasti. Obsahom je analýza vzťahu štruktúry materiálu s jeho vybranými magnetickými vlastnosťami, ako aj opis základných experimentálnych usporiadaní používaných pri meraniach.

Opísané sú konkrétne výsledky reprezentované konfigurovateľným systémom na snímanie magnetizačných charakteristík a Barkhausenovho šumu vzoriek konštrukčnej ocele, ako aj softvérový systém na analýzy získaných signálov otvorený pre ďalšie metódy ich spracovania a interpretácie. V práci sme sa venovali aj stanovovaniu intenzity magnetického poľa na otvorenej vzorke. Bol navrhnutý a vytvorený systém Hallových snímačov, ktorý umožňuje presnejšie stanovenie intenzity magnetického poľa na otvorených vzorkách. V poslednej časti práce sme sa venovali návrhu a vytvoreniu kompaktnej meracej sondy.

ABSTRACT:

Key words: nondestructive testing, Barkhausen effect, magnetism, hysteresis loop, Charpy sample

The work is focused on methods of non-destructive defectoscopy of ferromagnetic materials with a focus on magnetic testing of selected structural steel. The introduction of the thesis provides a summary of theoretical knowledge in the field. The content is an analysis of the relationship between the structure of the material and its selected magnetic properties, as well as a description of the basic experimental arrangements used in the measurements.

The specific results represented by a configurable system for sensing the magnetization characteristics and the Barkhausen noise of structural steel samples are described, as well as a software system for the analysis of the obtained signals, open for other methods of their processing and interpretation. The work also addresses the determination of the magnetic field intensity on an open sample. A system of Hall sensors was designed and developed, enabling more accurate determination of the magnetic field intensity on open samples. In the final part of the thesis, we focused on the design and creation of a compact measuring probe.

Obsah

Zoznam použitých symbolov

Úvod	1
1 Nedeštruktívne metódy testovania	3
1.1 Metóda Barkhausenovho šumu	3
2 Merací systém	5
2.1 Meranie na otvorenej vzorke	5
2.2 Softvérový návrh	6
3 Zmeny magnetických vlastností konštrukčných ocelí po tepelnom spracovaní	8
3.1 Magnetické testovanie feritickej nehrdzavejúcej ocele	8
3.2 Oceľ triedy 12	10
4 Testovanie vplyvu podmienok merania na magnetické vlastnosti konštrukčných ocelí	13
5 Stanovenie intenzity magnetického poľa na otvorenej vzorke	15
5.1 Systém Hallových sond	16
6 Meracia hlavica	18
Záver	27
Publikácie	28

Zoznam použitých symbolov

B	Magnetická indukcia [T]
B_m	Magnetická indukcia maximálna [T]
B_r	Remanentná indukcia [T]
B_s	Indukcia nasýtenia [T]
f	Frekvencia [Hz]
f_c	Frekvenčné centrum spektra [Hz]
f_{\max}	Maximálna frekvencia spektra [Hz]
$FWHM$	Celá šírka polovičné maximum [ms]
$FWHM_{pr}$	Priemerná hodnota celkovej šírky polovičného maxima [ms]
H	Intenzita magnetického poľa [A/m]
H_c	Koercitívne pole [A/m]
I	Elektrický prúd [A]
M	Magnetizácia [A/m]
N	Počet meraní [-]
N_1, N_2	Počet závitov [-]
R	Odpor [Ω]
R_N	Normálový odpor [Ω]
R_m	Magnetický odpor [H^{-1}]
R_{mj}	Magnetický odpor jarma [H^{-1}]
R_{mp}	Magnetický odpor parazitnej vzduchovej medzery [H^{-1}]
R_{mv}	Magnetický odpor vzorky [H^{-1}]
t	Čas [s]
T	Teplota [K]
u	Napätie [V]
U_i	Indukované napätie [V]
U_{RMS}	Efektívna hodnota napätia obálky Barkhausenovho šumu [V]
U_{RMSm}	Maximálna RMS hodnota napätia obálky Barkhausenovho šumu [V]
W	Objemová hustota energie [$J \cdot m^{-3}$]
\bar{x}	Priemerná hodnota [-]
x_i	Meraná hodnota [-]

δ	Hĺbka vniku [m]
δ_0	Relatívna odchylka v bode $z=0$ [%]
δ_{avg}	Priemerná relatívna odchýlka [%]
δ_H	Odchýlka [%]
δ_{max}	Maximálna relatívna odchýlka [%]
μ_0	Magnetická permeabilita vákua [H/m]
μ_r	Relatívna magnetická permeabilita [-]
σ	Merná elektrická vodivosť [S/m]
σ_s	Smerodajná odchýlka [-]
τ	Časová konštanta [-]

Úvod

Dizertačná práca sa zaoberá pokročilými metódami identifikácie magnetických vlastností feromagnetických materiálov s dôrazom na ich štrukturálnu diagnostiku. Hlavným cieľom je optimalizácia digitálne konfigurovateľného meracieho systému, ktorý je plne riadený počítačom a je určený na meranie a následnú analýzu magnetizačných charakteristík feromagnetických látok a Barkhausenovho šumu na účely kontroly materiálových vlastností a charakterizácie mikroštruktúry. V takto vytvorenom otvorenom prostredí sú implementované štandardne používané metódy analýzy magnetizačných charakteristík a Barkhausenovho šumu. Do tohto otvoreného systému je možné implementovať ďalšie pokročilé metódy analýzy magnetizačných charakteristík a Barkhausenovho šumu.

Prvá kapitola je venovaná zhrnutiu vybraných magnetických metód nedeštruktívnej defektoskopie. Tento prehľad poskytuje široký pohľad na dostupné techniky a ich aplikácie v praxi, čo je nevyhnutné pre správne navrhnutie a implementáciu meracích systémov. Druhá kapitola popisuje samotný merací systém. Na začiatku kapitoly sa venujeme popisu merania na uzavretých a otvorených vzorkách. Následne sa zaoberáme hardvérovým zapojením meracej aparatury a softvérovým návrhom na snímanie magnetizačných charakteristík a Barkhausenovho šumu. V rámci kapitoly je popísaná aj analýza a vyhodnotenie vybraných parametrov magnetizačných charakteristík a Barkhausenovho šumu. Tento komplexný prístup umožňuje presné a efektívne meranie potrebných parametrov. Tretia a štvrtá kapitola sa sústreďuje na experimentálnu časť práce. Popisuje magnetické testovanie vybraných konštrukčných ocelí. V šiestej kapitole sú popísané experimenty zamerané na skúmanie vplyvu tepelného spracovania vybraných konštrukčných ocelí a v siedmej kapitole je skúmaný vplyv podmienok merania, konkrétne vplyv priebehu intenzity magnetického poľa na meranie magnetických parametrov a Barkhausenovho šumu na vybraných typoch konštrukčných ocelí. Obsahuje podrobné popisy experimentov, vrátane prípravy vzoriek, meracích postupov a získaných výsledkov. Táto kapitola tiež analyzuje a interpretuje experimentálne data. Piata kapitola je venovaná stanoveniu intenzity magnetického poľa na otvorenej vzorke. V tejto kapitole sme popísali problém so stanovovaním intenzity magnetického poľa vo vzorke a navrhli sme systém Hallových sond na presnejšie určenie intenzity magnetického poľa vo vzorke. V poslednej kapitole tejto práce sme sa zamerali na návrh a implementáciu kompaktných meracích sond, ktoré integrujú všetky potrebné komponenty do jedného kompaktného púzdra. Prvým krokom bolo vytvorenie samostatných modulov. Po ich vytvorení sme prešli na návrh púzdra pomocou 3D modelovania v programe Fusion 360 a jeho realizáciu sme uskutočnili pomocou 3D tlače.

Tézy dizertačnej práce

- Zhodnotenie metód nedeštruktívnej defektoskopie konštrukčných ocelí so zameraním na magnetické testovanie a Barkhausenov šum.
- Optimalizácia usporiadania merania (definované budenie testovaného objemu materiálu z hľadiska priestorového rozloženia magnetického poľa, jeho časového priebehu a ko-

rektného stanovenia jeho hodnoty) s cieľom prispieť k porovnateľnosti podmienok merania.

- Rozvoj metód vyhodnotenia získaných signálov a hľadanie korelácie ich parametrov so štrukturálnymi zmenami na vybraných vzorkách konštrukčných ocelí.

1. Nedeštruktívne metódy testovania

Nedeštruktívne testovanie materiálov (NDT) predstavuje interdisciplinárnu oblasť zahŕňajúcu rôzne neinvazívne techniky určené na hodnotenie vlastností materiálov, komponentov alebo celých procesných jednotiek. NDT techniky sa využívajú na detekciu, charakterizáciu a meranie prítomnosti mechanických poškodení, ako sú korózia či praskliny. Tieto metódy dokážu lokalizovať defekty a určiť ich vlastnosti vrátane veľkosti, tvaru a orientácie [1].

Metódy NDT využívajú tepelné, mechanické a chemické namáhanie na odhalenie možných chýb v skúmanom objekte bez zmeny jeho vlastností, čo umožňuje jeho ďalšiu funkcionálnosť. NDT techniky sú schopné identifikovať defekty, ktoré by mohli spôsobiť havárie, ekonomické straty alebo poranenia, čím výrazne prispievajú k priemyselnej bezpečnosti. Štandardizované NDT postupy sú široko využívané v stavebníctve, strojárstve, automobilovom, leteckom, plynárenskom, chemickom a ropnom priemysle, ako aj v armáde a lodiarstve [2].

NDT sa považuje za bezpečný, spoľahlivý a nákladovo efektívny spôsob kontroly materiálov, komponentov a celých systémov bez poškodenia zariadení alebo prerušenia prevádzky. Na rozdiel od deštruktívneho testovania, ktoré poškodzuje alebo ničí testovanú časť počas kontroly, NDT metódy zachovávajú integritu skúmaného objektu. Deštruktívne testy, ako sú skúšanie ťahom a trojbodové ohybové testovanie, sa využívajú na stanovenie fyzikálnych vlastností materiálov, ale nie sú vhodné na kontinuálnu kontrolu kvality bez zničenia vzoriek [1].

Moderné NDT metódy sa používajú počas výroby a prevádzkových kontrol na zabezpečenie bezpečnosti a spoľahlivosti produktov. Počas výroby NDT zabezpečuje kontrolu kvality materiálov a procesov spájania, čím overuje, či vyrobené diely splnia požadované podmienky prevádzky a cyklov pred zlyhaním. NDT zohráva dôležitú úlohu pri zaručení bezpečnej prevádzky zariadení, kontroly kvality a hodnotení životnosti zariadenia. Kontroly sa vykonávajú počas prevádzky na sledovanie aktuálneho stavu poškodenia, mechanizmov poškodenia a hodnotení zostávajúcej životnosti zariadení. Intervaly kontrol sa líšia podľa veku zariadení a ich umiestnenia v životnom cykle [3, 4].

NDT metódy, podobne ako niektoré procesy v medicíne, nepracujú so živými objektami a ich výber je kritický pre optimalizáciu výkonu inšpekcie. Správna voľba NDT metód umožňuje efektívne povrchové vyšetrenie aj testovanie celého objemu materiálu, čo je kľúčové pre zabezpečenie spoľahlivosti a bezpečnosti priemyselných zariadení a systémov [3, 4].

1.1 Metóda Barkhausenovho šumu

Jedná sa o jednu z magnetických metód nedeštruktívnej defektoskopie. Využíva sa na hodnotenie mikroštruktúrnych vlastností materiálov. Feromagnetické materiály obsahujú spontánne namagnetované oblasti nazývané domény, ktoré sú oddelené Blochovými stenami. Tieto steny, ktoré môžu byť 90° alebo 180° , sú miesta, kde dochádza k zmene orientácie magnetizačných vektorov. Dôsledkom skokovej zmeny magnetizácie sa indukuje šumový signál, ktorý je možné detegovať pomocou snímanej cievky v blízkosti zmagnetizovanej vzorky. Toto indukované napätie sa nazýva Barkhausenov šum (BN) a vzniká v dôsledku pohybu Blochových stien počas

magnetizácie alebo demagnetizácie materiálu [5, 6, 7].

Toto šumové napätie je však so zvyšujúcou sa hĺbkou tlmené vo feromagnetických materiáloch. Príčinou tejto skutočnosti je obvykle vysoká konduktivita skúmaného materiálu. Elektromagnetické pole generované magnetizačným jarmom bude vo vzorke s hĺbkou exponenciálne klesať v smere kolmom na povrch kvôli tlmeniu vírivými prúdmi. Hĺbka vniku je ovplyvnená viacerými materiálovými parametrami, či parametrami snímania ako napríklad frekvencia buďiaceho signálu, merná elektrická vodivosť a permeabilita materiálu. Hĺbka prenikania δ je daná vzťahom

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (1.1)$$

kde f je frekvencia, σ je merná elektrická vodivosť materiálu, μ_0 je permeabilita vákua a μ_r je relatívna permeabilita materiálu [5, 8, 9, 10].

Pretože k BN dochádza najmä pohybom doménových stien, očakáva sa, že bude citlivý na rôzne faktory, ktoré môžu ovplyvniť pohyb doménových stien ako zvyškové napätie v materiáli, tvrdosť, zloženie (obsah uhlíka), veľkosť zrna a magnetizačné parametre [10, 11].

Tento jav je využívaný na detekciu defektov a na hodnotenie vlastností materiálov, ako sú veľkosť zrn, tepelné spracovanie, tvrdosť, deformácie, ako aj na určenie zvyškového napätia vo feromagnetických materiáloch [6, 10].

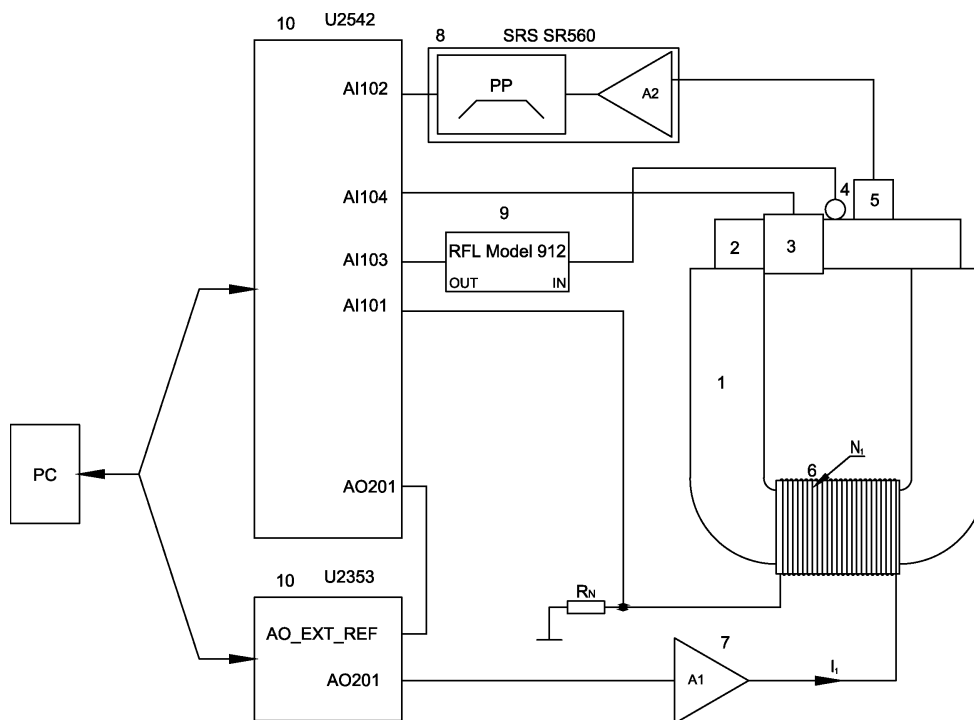
Analýza Barkhausenovho šumu zahŕňa vyhodnocovanie niekoľkých parametrov, ako sú RMS hodnota obálky šumového signálu (U_{RMS}), maximálna hodnota RMS obálky šumového signálu, štatistické rozdelenie pulzov Barkhausenovho šumu, spektrum šumového signálu, FWHM (celá šírka polovičné maximum), či histogram. Tieto parametre poskytujú dôležité informácie o vnútornej štruktúre a kvalite materiálu [12, 13].

2. Merací systém

V zásade poznáme dva typy usporiadaní meraní na snímanie magnetizačných charakteristík a Barkhausenovho šumového napätia: meranie na uzavretej vzorke a meranie na otvorenej vzorke. Z hľadiska merania ako výhodnejší spôsob merania je meranie na uzavretej vzorke. Toto nám však okolnosti často neumožňujú. V takých prípadoch sa dajú merania uskutočniť iba pomocou merania na otvorenej vzorke.

2.1 Meranie na otvorenej vzorke

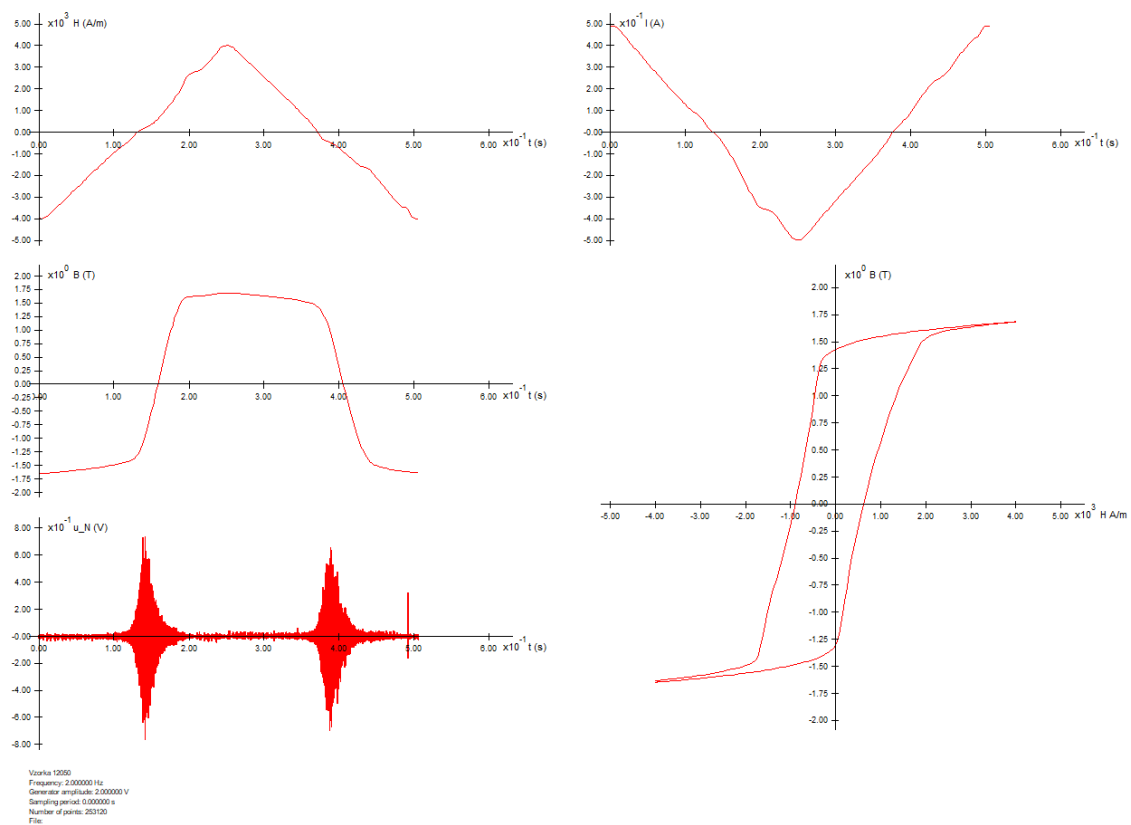
V takomto prípade je potrebné skúmanú vzorku v obvode doplniť o magnetovacie jarmo v tvare U. Doplnením magnetovacieho jarma do obvodu získame uzavretý magnetický obvod. Pri meraní na otvorených vzorkách sa však stretávame s problémom stanovenia intenzity magnetického poľa. Intenzitu magnetického poľa vo vzorke je možné stanoviť len nepriamym meraním a to meraním intenzity poľa v jej okolí. Na rozhraní materiálov s rôznymi hodnotami magnetickej permeability sa zachováva tangenciálna zložka intenzity magnetického poľa. Na meranie tangenciálnej zložky poľa sa používa Hallov senzor, ktorý sa umiestni do tesnej blízkosti povrchu vzorky. Priebeh magnetickej indukcie získame numerickou integráciou meraného priebehu indukovaného napätia v snímačej cievke navinutej na Charpyho vzorke. Barkhausenov šum na otvorených vzorkách meriame osobitne pomocou samostatnej snímačej cievky umiestnenej medzi pólmi jarma v strede vzorky. Schéma zapojenia pre meranie na otvorenej vzorke je zobrazená na Obr. 2.1.



Obr. 2.1. Schéma zapojenia merania na otvorenej vzorke; 1 - magnetovacie jarmo, 2 - Charpyho vzorka, 3 - snímacia cievka indukovaného napätia, 4 - sonda pripojená ku gaussmetru, 5 - snímacia cievka šumového napätia, 6 - budiace vinutie s počtom závitov N_1 , ktorým prechádza prúd I_1 , 7 - zosilňovač, 8 - nízkošumový predzosilňovač, ktorý zároveň slúži aj ako filter zapojený ako aktívna pásmová priepusť, 9 - gaussmeter, 10 - meracie karty, normálny odpor R_N .

2.2 Softvérový návrh

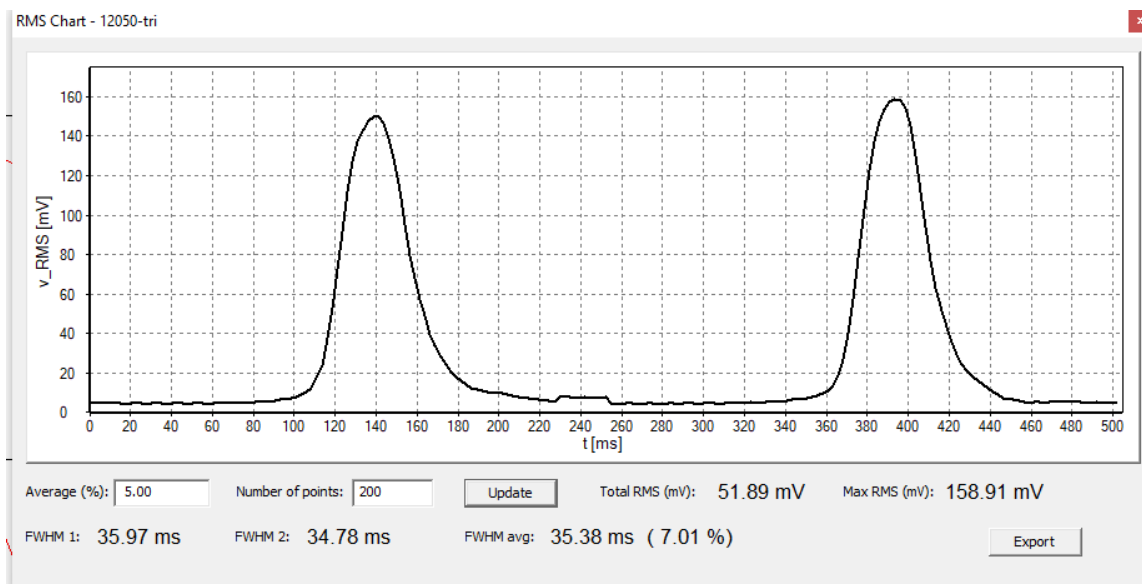
Bola vyvinutá softvérová aplikácia na meranie magnetizačných charakteristík a Barkhausenovho šumu feromagnetických materiálov na účely identifikácie magnetických vlastností feromagnetických materiálov a charakterizácie mikroštruktúry. Program umožňuje meranie, spracovanie a zaznamenávanie nameraných údajov do súboru. Po rozbere problému sme program rozdelili do viacerých častí: generovanie budiaceho signálu, demagnetizácia vzorky, spracovanie meraní a ich zápis do súboru. Uložený dátový súbor z merania je importovaný do nášho programu s interným názvom "Barkhausen Studio", ktorý je neustále zdokonaľovaný a bol vyvinutý na vyhodnotenie nameraných priebehov. Je navrhnutý na detailnú analýzu a vyhodnotenie magnetizačnej charakteristiky, avšak primárne Barkhausenovho šumu. Program Barkhausen studio poskytuje širokú škálu funkcií na analýzu nameraných dát, pričom umožňuje užívateľovi graficky zobrazovať a vyhodnocovať rôzne parametre hystereznej slučky a Barkhausenovho šumu Obr. 2.2.



Obr. 2.2. Namerané priebehy zobrazené v programe Barkhausen studio.

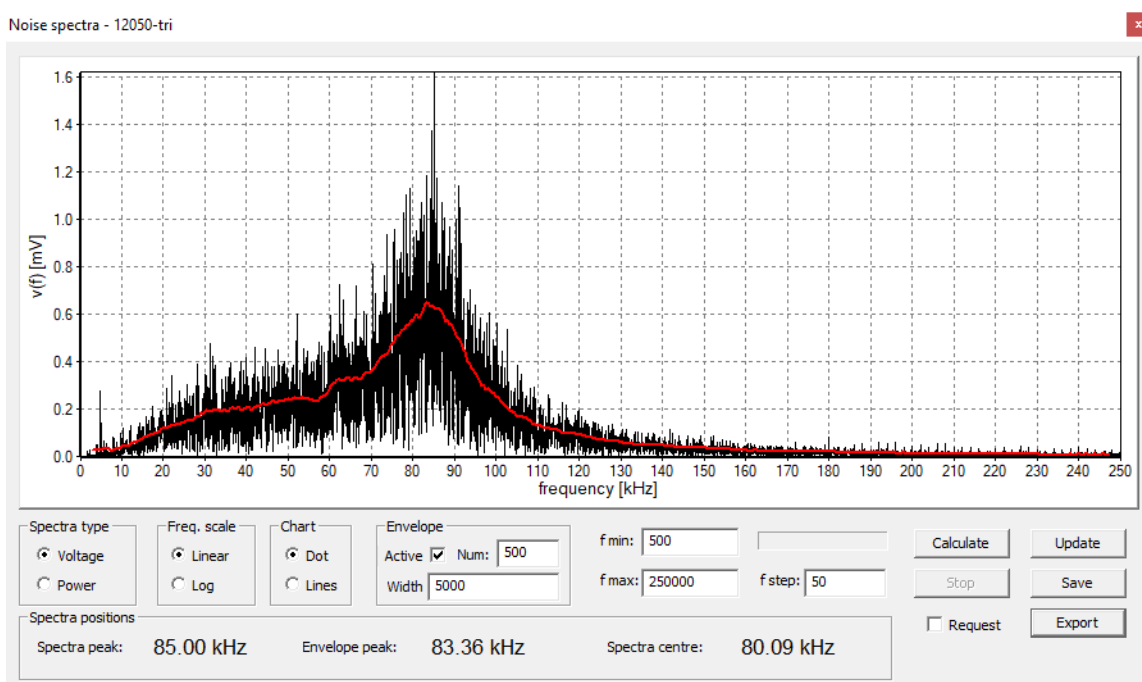
Po načítaní dátových súborov program automaticky vypočíta niekoľko kľúčových parametrov hystereznej slučky, ktoré sú zásadné pre charakterizáciu magnetických vlastností materiálu. Hlavnou úlohou programu je však podrobná analýza Barkhausenovho šumu, ktorá je nevyhnutná pre hlboké porozumenie mikromagnetických procesov v materiáli. Medzi analyzované parametre patria: efektívna hodnota šumového napätia U_{RMS} , FWHM (celková šírka pri polovičnom maxime), spektrum šumu a štatistické rozdelenie špičiek impulzov šumu (histogram). Všetky parametre sú analyzované v samostatnom okne. Každé okno disponuje s ovládačom Export, pomocou ktorého je po ukončení analýzy možné tieto údaje uložiť do samostatného textového súboru.

Na Obr. 2.3 vidíme priebeh obálky šumového napätia spolu s vypočítanými parametrami ako Total RMS (mV), kde daná hodnota reprezentuje vypočítanú hodnotu RMS z celého priebehu šumového napätia. Ďalej poskytuje informáciu o hodnote Max RMS (mV) vyjadrujúcu maximálnu hodnotu obálky šumového napätia. Parameter FWHM1 a FWHM2 sú je vypočítané hodnoty z prvej a druhej polperiódy magnetizačného cyklu. Následne z týchto dvoch údajov počítame priemernú hodnotu $FWHM_{avg}$.



Obr. 2.3. Priebeh obálky Barkhausenovho šumu spolu s vypočítanými parametrami.

Na Obr. 2.4 je zobrazený rozložený šumový signál na jeho frekvenčné komponenty spolu s jeho vypočítanými parametrami ako vrcholová hodnota spektra (Spectra peak) a ťažisko spektra (Spectra centre). V prípade označenia políčka Active v časti Envelope program zobrazí vypočítanú obálku spektra, ako aj vypočítaný parameter Envelope peak, ktorý vyjadruje maximálnu hodnotu obálky Barkhausenovho šumu.



Obr. 2.4. Priebeh frekvenčného spektra Barkhausenovho šumu spolu s vypočítanými parametrami.

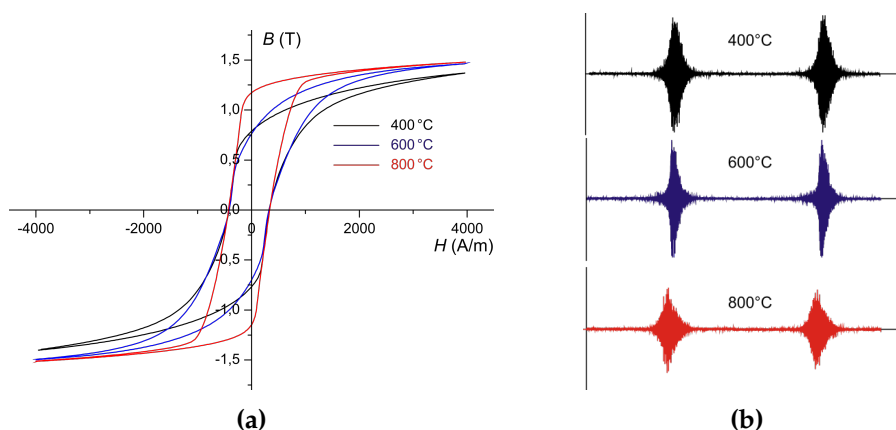
3. Zmeny magnetických vlastností konštrukčných ocelí po tepelnom spracovaní

Na tepelné spracovanie a magnetické meranie bola použitá vzorka Charpyho typu s rozmermi 10 x 10 x 55mm. Pomocou meracej aparatury boli pred tepelným spracovaním realizované merania magnetických vlastností a Barkhausenovho šumu v pôvodnom stave materiálu. Vzorka bola umiestnená počas merania na magnetizačné jarmo. Merania boli vykonávané pri trojuholníkovom časovom priebehu výstupného napätia D/A prevodníka, čo zodpovedalo približne trojuholníkovému priebehu intenzity magnetického poľa. Merania sme realizovali pri rozkmitate intenzity magnetického poľa 2kA/m. Frekvencie budiaceho signálu bola 2Hz. Barkhausenov šum bol meraný pomocou snímačnej cievky a následne filtrovaný pomocou pásmovej priepuste. Po ukončení meraní boli namerané magnetizačné charakteristiky a Barkhausenov šum spracované v programe a uložené pre ďalšiu analýzu.

3.1 Magnetické testovanie feritickej nehrdzavejúcej ocele

Bol skúmaný vplyv žihania na modifikáciu magnetických vlastností nehrdzavejúcej feritickej feromagnetickojej ocele 1.4105 (AISI 430F) [14]. Jedná sa o nízkouhlíkovú oceľ s vyšším obsahom síry.

Vzorka bola postupne žihaná pri teplotách od 100°C do 800°C s krokom 100°C počas 15 minút za prístupu atmosféry. Po vytiahnutí vzorky z pece nasledovalo voľné chladenie na vzduchu. Po vychladnutí vzorky po každom žihaní boli realizované merania magnetizačných charakteristík a Barkhausenovho šumu. Z dôvodu aby sa predišlo nožnej tvorbe hrubých zrn, tak bola maximálna teplota žihania zvolená pod 850°C.



Obr. 3.1. (a) Hysterézne slučky po žihaní vzorky zaznamenané pri frekvencii $f = 2$ Hz, (b) Barkhausenov šum zaznamenaný po žihaní vzorky počas jedného magnetizačného cyklu

Na Obr. 3.1 vidíme zaznamenané hysterézne slučky a Barkhausenov šum po jednotlivých žihaniach pre vybrané teploty. Pre všetky znázornené šumové signály bola použitá identická stupnica napätia. Pri analýze meraných signálov pri teplote žihania do 400°C neboli zistené žiadne viditeľné zmeny vybraných parametrov. Na základe čoho je možné konštatovať, že štruktúra vzorky sa pravdepodobne menila až pri vyšších teplotách. Realizovaná bola analýza efektív-

nej hodnoty šumového napätia, napät'ové spektrum, či štatistické rozdelenie špičiek impulzov šumového napätia (histogram).

Špičková hodnota obálky efektívnej hodnoty signálu šumu U_{RMSm} je úmerná súčinu počtu Barkhausenových skokov $n(H)$ a rýchlosti zmeny magnetizácie $\frac{dM}{dt}$ [15, 16]

$$U_{\text{RMSm}} \propto n(H) \frac{dM}{dt} \quad (3.1)$$

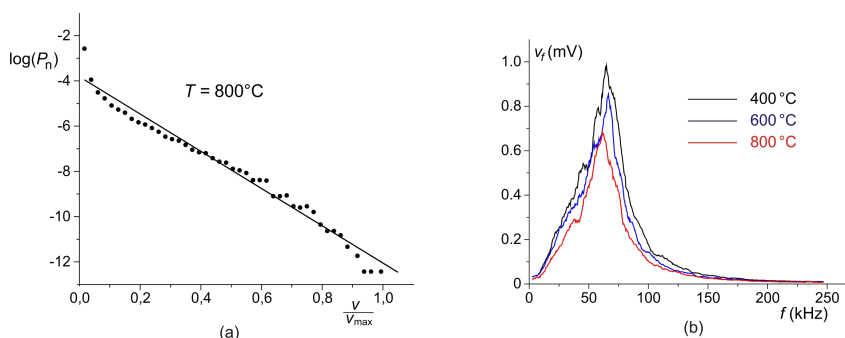
Rýchlosť zmeny magnetizácie $\frac{dM}{dt}$ bola udržiavaná približne rovnaká v najstrmšej časti hysteréznej slučky, kde sa generuje najväčší počet Barkhausenových skokov v dôsledku náhleho pohybu 180° doménových stien v blízkosti koercitívneho poľa, možno predpokladať, že U_{BN} je priamo úmerná množstvu Barkhausenových skokov $n(H)$ a nakoniec koncentrácii záchytných centier klesajúcich so zvyšujúcou teplotou žihania. Dochádzalo k postupnému poklesu záchytných centier žiháním pri vyšších teplotách. Táto skutočnosť naznačuje pokles počtu „skokových udalostí“ spôsobených poklesom záchytných centier pre Blochove (doménové) steny. Pri analýze amplitúdovej distribúcie vrcholov BN signálu pre mäkké magnetické materiály sme využívali model ABBM, ktorý je platný pri nízkej rýchlosti zmeny magnetického poľa $\frac{dH}{dt}$. Pravdepodobnostné rozdelenie absolútnej hodnoty BN signálu je možné vyjadriť nasledovným vzťahom:

$$P(v) = k \cdot e^{-\alpha v} \quad (3.2)$$

Bola potrebná normalizácia napätia pre možnosť porovnania jednotlivých meraní pri rôznych teplotách žihania, a teda s rôznou úrovňou šumového napätia. Normalizácia bola realizovaná na maximum v_{max} pre každú závislosť individuálne. Výsledný upravený vzťah po dosadení normalizácie je nasledovný:

$$\log(P_n) = \log(k_n) - \alpha_n \cdot \frac{v}{v_{\text{max}}} \quad (3.3)$$

Na Obr. 3.2a) máme zobrazenú logaritmickeú distribúciu s lineárnym prispôbením pre teplotu žihania 800°C a na obrázku (Obr. 3.2b) je možné vidieť spektrum šumového napätia, ktoré sme vypočítali pomocou priamej Fourierovej transformácie (DFT).



Obr. 3.2. a) Logaritmicke rozdelenie vrcholov BN signálu s lineárnou náhradou po žihaní na teplotu 800°C , b) spektra šumového signálu pre vybrané teploty žihania

Pre počiatočný stav ako aj pre jednotlivé teploty žihania je možné v Tab. 3.1 vidieť hodnoty koeficientov ako $\log(k_n)$, α_n a regresný koeficient $|r|$.

Zistilo sa, že sklon distribučnej závislosti (Obr. 3.2a) je daný hodnotou α . Ten bol vo všet-

kých prípadoch takmer rovnaký. Teda môžeme konštatovať, že daný parameter nie je závislý od žihania. Pre všetky merané závislosti bola absolútna hodnota regresného koeficientu vyššia ako 0,970.

Znamená to, že nedošlo ku zmene štatistického rozdelenia špičiek impulzov šumového signálu. Preto môžeme konštatovať, že typ záchytných centier doménových stien sa ani po žíhaní nezmenil. Takúto úvahu by mohli podporiť spektrá šumu (Obr. 3.2b), ktorých tvar a špičková frekvencia blízko 70 kHz sa po žíhaní tiež nezmenili.

Tabuľka 3.1: Parametre logaritmického rozloženia vrcholov šumového napätia.

T (°C)	U_{RMSm} (mV)	$\log(k_n)$	α_n	$ r $
(initial)	294	-3.780	-9.407	0.980
100	296	-3.713	-10.367	0.979
200	303	-3.832	-8.948	0.981
300	301	-3.820	-9.565	0.977
400	300	-3.816	-9.131	0.978
500	295	-3.875	-9.092	0.977
600	278	-4.166	-9.318	0.971
700	205	-3.872	-10.155	0.978
800	197	-3.582	-10.050	0.983

V popísanom experimente boli skúmané zmeny vlastností feritických nehrdzavejúcich ocelí spôsobené žíhaním. Využívalo sa nedeštruktívne magnetické testovanie pomocou analýzy Barkhausenovho šumu, mikrosnímky štruktúry a merania tvrdosti podľa Vickersa, ktoré preukázalo zmenu z 221 ± 2 HV2 (pôvodný stav) na 152 ± 2 HV2 (po žíhaní). Zmena tvrdosti zodpovedá uvoľneniu vnútorných napätí a tým aj zníženiu koncentrácie zachytávacích centier (dislokácií) pre pohyb doménových stien. Do teploty žihania 400°C neboli zistené žiadne štrukturálne zmeny skúmaného materiálu. Na základe nedeštruktívneho testovania analýzou Barkhausenovho šumu, sme konštatovali, že pokles koncentrácie záchytných centier doménových stien v materiály sú výsledkom iba poklesu koncentrácie dislokácií, keďže v dôsledku žihania sa znížila iba maximálna hodnota RMS napätia šumu, zatiaľ čo špičkové rozloženie a spektrá šumu nevykazovali výraznú zmenu. Toto zistenie potvrdila aj štrukturálna analýza, ktorá ukázala, že veľkosť feritických zŕn sa nezväčšila, ale tvrdosť vykazovala značný pokles pri vyšších teplotách [14].

3.2 Oceľ triedy 12

V rámci experimentu boli použité vzorky ocele 12 014. Jedná sa o nízkouhlíkovú ušľachtelú konštrukčnú oceľ. Oceľ 12 014 vykazuje tvrdosť v rozsahu 95-105 HV (Vickersova tvrdosť). [17, 18].

Vzorka bola žíhaná pri teplote 1050°C po dobu 20 minút. Po žíhaní bola vzorka prudko ochladená ponorením do studenej vody. Vzorku sme v čo najkratšom možnom čase po žíhaní vložili do meracieho systému. Prvé meranie magnetických parametrov bolo vykonané približne 20 minút od ochladenia vzorky. Vzorka bola ďalej meraná kontinuálne vo vhodne zvolených časových intervaloch počas 70 hodín. Doba trvania meraní bola zvolená v závislosti od zmeny tvrdosti materiálu. Po tejto dobe už nie je vidieť zmeny tvrdosti materiálu. Každé meranie

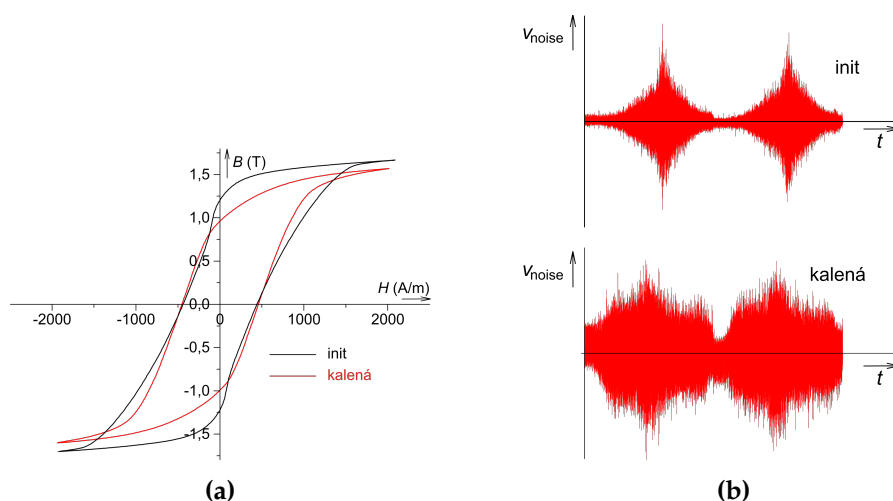
magnetických parametrov vzorky obsahuje zaznamenanú hystereznú slučku a Barkhausenov šum. Vyhodnotenie získaných magnetických parametrov je zhrnuté v Tab. 3.2.

Tabuľka 3.2: Magnetické parametre vzorky ocele 12 014 pred a po žíhaní.

Pôvodný stav	U_{RMS} (mV)	f_c (kHz)	$FWHM_{\text{pr}}$ (ms)	B_m (T)	B_r (T)	H_c (A/m)	$\mu_r @ H_c$ (-)	B_r/B_m (-)	W ($J \cdot m^{-3}$)
poč.st.	12.50	70.43	74.04	1.684	1.143	430.1	1790.2	0.679	3207.0
$t \approx 0$ hod.	23.96	69.91	190.29	1.585	0.991	442.0	2282.8	0.615	2501.4
$t \approx 70$ hod.	24.29	70.62	187.59	1.600	1.039	464.2	2258.9	0.649	2664.0

Parameter U_{RMS} vyjadruje efektívnu hodnotu Barkhausenovho šumu počas jedného magnetizačného cyklu, f_c predstavuje frekvenčné centrum spektra, $FWHM_{\text{pr}}$ ktorý predstavuje priemernú hodnotu šírky signálu Barkhausenovho šumu na polovici jeho maximálnej intenzity. Vyhodnocovaný bol aj parameter $\mu_r @ H_c$, ktorý reprezentuje relatívnu permeabilitu pri koerčitívnom poli poskytujúcu informáciu o sklone hystereznej slučky v tomto bode. Mieru pravouhlosti hystereznej slučky možno vyjadriť pomerom remanentnej a maximálnej magnetickej indukcie B_r/B_m , pričom pre ideálne pravouhlú slučku by platilo $B_r/B_m = 1$. V prvom riadku môžeme vidieť vyhodnotenie poč. st. (počiatočný stav vzorky), čo vyjadruje meranie pred žíhaním vzorky. V druhom riadku je vyhodnotené prvé meranie v čase $t \approx 0$ hod. po žíhaní vzorky a jeho následnom prudkom ochladní v studenej vode. Posledný riadok obsahuje vyhodnotené údaje merania v čase $t \approx 70$ hod., pričom toto meranie vyjadruje posledné meranie zo série meraní približne po 70 hodinách od prvého merania po žíhaní.

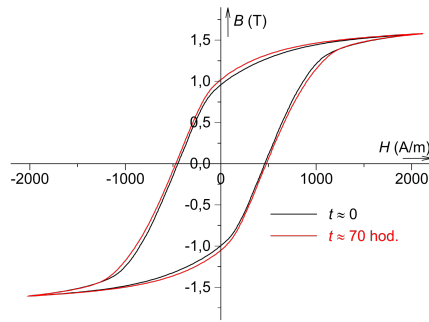
Na Obr. 3.3a môžeme vidieť grafické porovnanie hysterezných slučiek a na Obr. 3.3b môžeme vidieť grafické zobrazenie Barkhausenovho šumu.



Obr. 3.3. Porovnanie hysterezných slučiek (a) a Barkhausenových šumov (b) počas jednej periódy pred žíhaním (poč.st.) a po žíhaní ($t \approx 0$ hod) vzorky 12014.

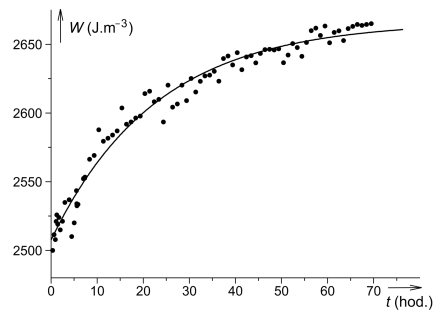
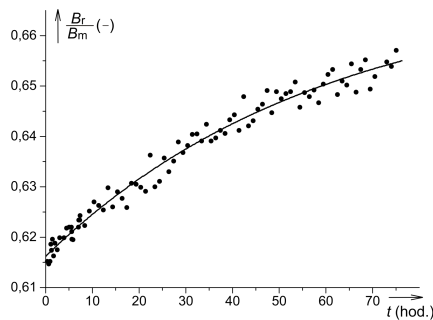
Po žíhaní vzorky sa nezistili významné časové zmeny Barkhausenovho šumu. Boli však zaznamenané zmeny v tvare hystereznej slučky, a to v miernom zvýšení remanentnej magnetickej indukcie (B_r). Obr. 3.3a ukazuje, že pôvodne mala hysterezná slučka "pravouhlejší" tvar, ktorý sa počas kalenia zmenil a remanentná indukcia poklesla.

Na obrázku Obr. 3.4 môžeme vidieť porovnanie hysteresovej slučky ihneď po žíhaní a prudkom schladené vzorky (prvé meranie série $t \approx 0$ hod) a po poslednom meraní série ($t \approx 70$ hod).



Obr. 3.4. Časová zmena tvaru hysteréznej po tepelnom opracovaní vzorky 12014 v čase $t \approx 0$ hod a $t \approx 70$ hod.

Tieto zmeny nie sú na prvý pohľad výrazné, zaujímavejšia je však časová závislosť parametrov vyplývajúcich z tvaru hysteréznej slučky (pomer B_r/B_m (Obr. 3.5), či W (Obr. 3.6).



Obr. 3.5. Časová zmena pomeru remanentnej a maximálnej magnetickej indukcie vzorky B_r/B_m . **Obr. 3.6.** Časová zmena objemovej hustoty energie na jeden premagnetovací cyklus W .

Predpokladajme, že vývoj vybraných parametrov spojených so štruktúrou skúmaného materiálu v čase bude opísaný funkciou relaxačného typu, a teda zmeny magnetických vlastností po rýchlom ochladení sú spôsobené postupným zvýšením koncentrácie precipitátov opísaných Wert-Zenerovou rovnicou. Následne by mal byť časová závislosť magnetických parametrov tiež popísaná funkciou relaxačného typu obsahujúcou člen $e^{-\frac{t}{\tau}}$, kde τ je časová konštanta. S ohľadom na tvar závislostí na Obr. 3.5 a Obr. 3.6 bude aproximačná funkcia vyzerat' nasledovne

$$f(t) = a - b \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.4)$$

kde a , b a τ sú parametre aproximácie nadobúdajúce hodnoty

$$\frac{B_r}{B_m} = 0,6698 - 0,536 \cdot e^{-\frac{t}{59,3}} (-; \text{hod.}) \quad (3.5)$$

$$W = 2587 - 158,8 \cdot e^{-\frac{t}{22,8}} (J.m^{-3}; \text{hod.}) \quad (3.6)$$

Napriek tomu, že obe závislosti majú spoločné fyzikálne pozadie, časové konštanty sú odlišné (59,3 hod., 22,8 hod.). Je to pravdepodobne spôsobené komplikovaným a nelineárnym vzťahom týchto magnetických parametrov ku štruktúrnym zmenám prebiehajúcich v materiáli. Boli realizované aj opakované merania tvrdosti podľa Vickersa. Za základe nich bolo zistené zvýšenie tvrdosti ocele z hodnoty 131 HV2 (po ochladení vzorky) na hodnotu 171 HV2 (po 80 hodinách).

4. Testovanie vplyvu podmienok merania na magnetické vlastnosti konštrukčných ocelí

Skúmali sme vplyv priebehu intenzity magnetického poľa na meranie magnetických parametrov a Barkhausenovho šumu na vybraných typoch konštrukčných ocelí. Pre účel týchto meraní sme použili vzorky Charpyho typu z ocele 12 014, 12 020 a 12 050. Merania boli realizované snímaním hysteréznej slučky a Barkhausenovho šumu. Merania boli vykonávané pri trojuholníkovom a sínusovom priebehu intenzity magnetického poľa, počas ktorých bola frekvencia budiaceho signálu činila 2 Hz a špičková hodnota intenzity bola 2 kA/m. Vyhodnotené parametre hysteréznej slučky ako aj Barkhausenovho šumu môžeme vidieť v Tab. 4.1.

Tabuľka 4.1: Magnetické parametre vzorky ocele 12 020 pri rôznych tvaroch priebehu intenzity magnetického poľa.

Vzorka	U_{RMS} (mV)		f_{max} (kHz)		f_c (kHz)		$FWHM_{\text{pr}}$ (ms)	
	<i>sin</i>	<i>tri</i>	<i>sin</i>	<i>tri</i>	<i>sin</i>	<i>tri</i>	<i>sin</i>	<i>tri</i>
12 020	14,175	14,241	70,31	71,79	71,46	71,69	73,63	95,18
12 050	13,781	13,660	68,35	70,31	68,78	68,77	68,30	88,40
12 014	24,731	24,811	68,84	72,28	69,81	70,05	44,80	55,87

Vzorka	W (J·m ⁻³)		H_c (A/m)		U_{RMSm} (mV)		$\mu_r @ H_c$ (-)	
	<i>sin</i>	<i>tri</i>	<i>sin</i>	<i>tri</i>	<i>sin</i>	<i>tri</i>	<i>sin</i>	<i>tri</i>
12 020	3619	3078	487,5	413,4	30,88	27,08	1651,1	1754,7
12 050	2893	2475	412,5	345,8	30,41	27,42	1764,5	2068,4
12 014	3573	3361	574,2	532,8	67,08	60,89	2067,8	2444,6

V rámci meraní sme zaviedli nový parameter f_c , ktorý vyjadruje ťažisko spektra šumového signálu daný vzťahom

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^N v_i} \quad (4.1)$$

Ak sa pozrieme na Tab. 4.1 s vyhodnotenými údajmi hysteréznej slučky a Barkhausenovho šumu, tak vidíme že všetky vybrané parametre hysteréznej slučky sú závislé od režimu budenia, avšak v prípade Barkhausenovho šumu parameter U_{RMS} a f_c sa javia byť relatívne stabilné v prípade zmeny tvaru budiaceho signálu.

Vzhľadom na tvar spektra dochádza k náhodnej fluktuácii polohy maxima. Pri opakovanej sérii meraní pri definovaných podmienkach merania dochádzalo k rozptýleným hodnotám polohy maxima spektra, zatiaľ čo ťažisko spektra ostalo pomerne stabilné. Dané výsledky meraní sú uvedené v Tab. 4.2.

Tabuľka 4.2: Parametre spektra Barkhausenovho šumu meranej vzorky 12050 za rovnakých podmienok.

	Maximum spektra [kHz]	Maximum obálky spektra [kHz]	Ťažisko spektra [kHz]
	85,000	83,545	80,093
	90,049	82,564	80,439
	87,050	85,018	79,936
	83,049	84,036	79,943
	81,349	82,564	80,658
	82,501	81,582	79,907
	79,100	84,036	80,135
	88,950	85,018	79,928
	84,201	83,545	80,104
	81,500	83,054	79,928
Priemerná hodnota	84,2749	83,4962	80,1071
Smerodajná odchýlka	3,333456	1,040047	0,239798

Z dostupných údajov sme vypočítali smerodajnú odchýlku podľa nasledujúceho vzťahu

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

kde \bar{x} je priemerná hodnota, ktorú sme získali ako aritmetický priemer meraných hodnôt.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4.3)$$

vypočítaný ako súčet všetkých meraných hodnôt x_i delený počtom meraní N .

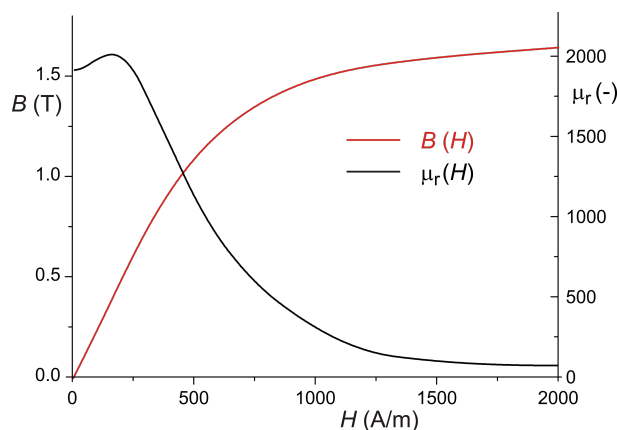
Výsledné smerodajné odchýlky je možné vidieť v Tab. 4.2. Z uvedených hodnôt smerodajných odchýlok vyplýva, že v porovnaní s parametrami maximum spektra a maximum obálky spektra, bol parameter ťažisko spektra stabilnejší.

5. Stanovenie intenzity magnetického poľa na otvorenej vzorke

Intenzitu magnetického poľa vo vzorke je možné stanoviť len nepriamym meraním. Najjednoduchšie riešenie je meranie tangenciálnej zložky poľa Hallovým sensorom, ktorý sa aplikuje do tesnej blízkosti povrchu vzorky. Spravidla bežne používaný Hallov sensor má približne 3 mm (SMD púzdra). Ak berieme do úvahy fakt, že snímač je umiestnený v strede púzdra, tak jeho minimálna výška umiestnenia je 1,5 mm nad vzorkou, čo môže spôsobiť značné chyby pri stanovovaní intenzity magnetického poľa. Spresnenie merania je možné dosiahnuť použitím viacerých snímačov umiestnených v rôznych výškach nad vzorkou. Následne intenzitu magnetického poľa vo vzorke získame extrapoláciou údajov z týchto snímačov. Viacerí autori zvolili dvojicu snímačov [12, 19, 20, 21]. V niektorých prípadoch bola použitá dvojica snímačov spolu s tieniacim krytom. [13]. Vo všetkých týchto prípadoch bolo pole vo vzorke určené lineárnou extrapoláciou. Keďže šírka Charpyho vzorky je porovnateľných rozmerov v porovnaní so vzdialenosťou najvyššie umiestnených sensorov od povrchu vzorky, pokles intenzity poľa so vzdialenosťou od povrchu vzorky môže byť relatívne nelineárny a strmý. Teda lineárna extrapolácia môže spôsobiť značnú chybu merania.

Analyzované magnetické pole nad vzorkou bolo realizované pomocou metódy konečných prvkov v programe ANSYS. Vo vytvorenom modeli bol použitý materiál jarma s konštantnou relatívnou permeabilitou 1000. Z dôvodu väčšej plochy prierezu jarma v porovnaní so vzorkou bola zanedbaná jeho nelinearita.

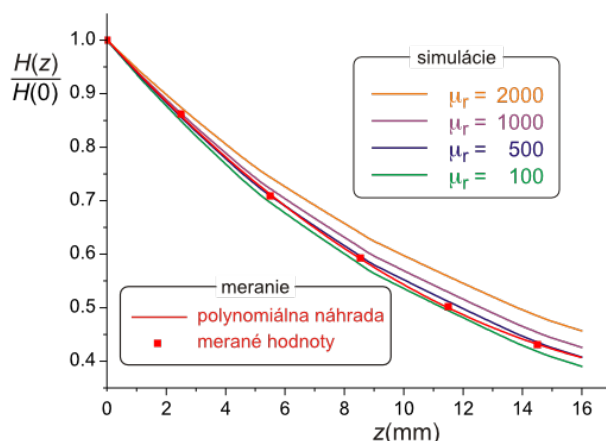
Je známe, že permeabilita vzorky sa počas magnetizačného cyklu pomerne výrazne mení. Krivka prvotnej magnetizácie a závislosť statickej permeability $\mu_r = B/(\mu_0 H)$ ocele typu 12040 je zobrazená na Obr. 5.1.



Obr. 5.1. Závislosť krivky prvotnej magnetizácie a statickej permeability.

Simulácia bola vykonaná pre hodnoty relatívnej permeability vzorky 100, 500, 1000 a 2000. Závislosť tangenciálnej zložky (vzhľadom na povrch vzorky) intenzity magnetického poľa od vzdialenosti od povrchu vzorky nad jej stredom $H(0) = H(0, 0, z)$ bola normalizovaná na hodnotu na povrchu vzorky $H(0) = H(0, 0, 0)$. Na obrázku Obr. 5.2 je možné vidieť simuláciu porovnanú s meraním, pričom vidíme že zobrazené závislosti sú nelineárne a ich sklon sa mení s permeabilitou. Intenzita magnetického poľa bola meraná pri hodnote intenzity magnetického

poľa, ktorá dosahovala približne 1000 A/m tesne nad povrchom vzorky .



Obr. 5.2. Závislosť normalizovanej intenzity magnetického poľa od vzdialenosti nad povrchom vzorky.

Z uvedených priebehov sme zistili, že simulované a merané závislosti sa dajú vždy dobre aproximovať polynómami 3. rádu.

$$H(z) = c_3z^3 + c_2z^2 + c_1z + c_0 \quad (5.1)$$

Porovnanie výsledku simulácie a aproximácie polynómami 3. rádu je v Tab. 5.1.

Tabuľka 5.1: Porovnanie simulácie a polynómom 3. rádu , údaje v %

μ_r	δ_{avg}	δ_0	δ_{max}
100	0.472	1.746	1.746
500	0.455	1.684	1.684
1000	0.435	0.541	1.201
2000	0.140	0.209	0.503

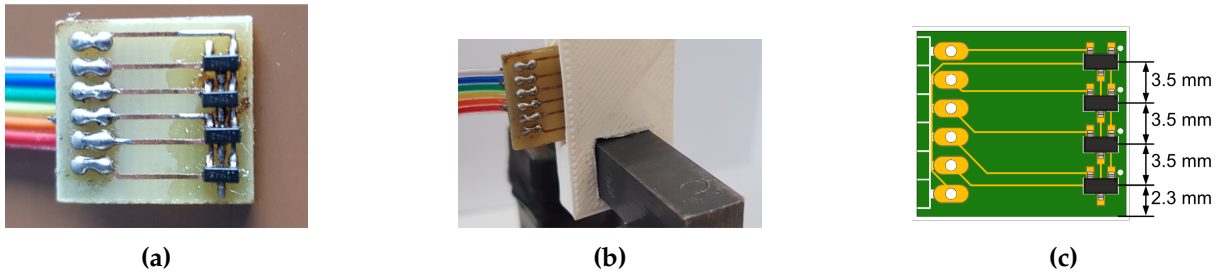
kde δ_{avg} vyjadruje priemerný relatívny rozdiel medzi polynómovým prispôbením a simuláciou v rámci celej závislosti

$$\delta_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|H_{i,fit} - H_{i,sim}|}{H_{i,sim}} \quad (5.2)$$

N je počet bodov, v ktorých bola vyhodnotená simulácia a polynóm. δ_0 je relatívny rozdiel medzi polynómovou extrapoláciou a simulovanými údajmi pri $z = 0$ (povrch vzorky) a δ_{max} je maximálny zistený relatívny rozdiel medzi simuláciou a polynómom až do 16 mm nad vzorkou [22].

5.1 Systém Hallových sond

Pri návrhu systému Hallových sond boli použité Hallove snímače Texas Instruments DRV5053 s citlivosťou -90 mV/mT v puzdre SOT-23, ktoré sú zobrazené na Obr. 5.3. Pre jednoznačné určenie koeficientov polynómu 3. stupňa je potrebné poznať hodnoty poľa nad povrchom vzorky aspoň v štyroch bodoch. Na základe tejto skutočnosti sme použili skupinu štyroch senzorov rozmiestnených v definovaných vzdialenostiach od povrchu vzorky. Tieto senzory sme umiestnili do tesnej blízkosti nad vzorkou.



Obr. 5.3. (a) reálne vyhotovenie DPS , (b) umiestnenie DPS nad meranou vzorkou, (c) 3D model DPS s Halloými snímačmi.

Nech hodnoty intenzity magnetického poľa H_1, \dots, H_4 sú namerané v bodoch z_1, \dots, z_4 . Potom môže byť koeficient aproximačného polynómu určený hodnotami intenzity poľa v týchto bodoch pomocou systému rovníc

$$\begin{bmatrix} c_3 & c_2 & c_1 & c_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Intenzita magnetického poľa na povrchu vzorky ($z = 0$) je potom daná vzorcom

$$H|_{z=0} = c_0 \quad (5.4)$$

Preto postačuje nájsť iba jeden koreň sústavy rovníc c_0 .

V porovnaní s často používaným meraním pomocou jedného snímača, alebo lineárnou extrapoláciou hodnôt viacerých snímačov, túto hodnotu vieme určiť presnejšie meraním pomocou 4 snímačov a ich extrapoláciou polynómom 3. stupňa. V prípade vzorky iných rozmerov, prípadne tvaru, je možné senzor pomerne jednoducho prispôbiť zmenou aproximačnej funkcie [22].

6. Meracia hlavica

V danej kapitole sa budeme venovať kompaktným snímačom na snímanie Barkhausenovho šumu na otvorených vzorkách. V tejto oblasti existuje celý rad štúdií, ktorý skúmal vývoj kompaktných snímačov na snímanie Barkhausenovho šumu. Viacero autorov skúmalo vývoj a optimalizáciu kompaktných snímačov na meranie magnetického Barkhausenovho šumu, pričom niektorí autori sa zamerali na zmenšenie veľkosti kompaktného snímača [23]. Existuje napríklad návrh kompaktného snímača pre miniaturizované vzorky [24]. Ďalej nájdeme aj optimalizovaný dizajn snímača na meranie Barkhausenovho šumu, berúc do úvahy vplyv konštrukčných parametrov ako materiál jadra, dĺžka jadra či rozstup pólov [25].

Tradičné laboratórne sondy na snímanie magnetizačných charakteristík a Barkhausenovho šumu obvykle pozostávajú z magnetizačného jarma s budiacou cievkou, snímačej cievky, Hallovoho senzora na snímanie tangenciálnej zložky intenzity magnetického poľa nad povrchom vzorky a snímačej cievky šumového signálu (Obr. 2.1).

Kompaktnú meraciu hlavicu vieme rozdeliť na viacero častí. Rozdelili sme ju na nasledovné tri samostatné moduly, pomocou ktorých sme schopní generovať a snímať požadované napäťové signály:

- magnetizačné jarmo obsahujúce budiace vinutie, ako aj snímačie vinutie na snímanie indukovaného napätie,
- snímačia cievka s integrovaným feritovým jadrom,
- systém Hallových snímačov.

Tieto moduly sme následne integrovali do jedného kompaktného systému.

V prípade merania na otvorených vzorkách sa v priemyselnej oblasti môžeme stretnúť s veľkým množstvom tvarov materiálov (napr.: vzorky tvaru valca, kvádra, ozubené kolesá a iné). Pri meraní takýchto vzoriek sa najčastejšie stretávame s usporiadaním, kedy je meraná vzorka doplnená o magnetovacie jarmo s budiacim vinutím. Pri tomto type usporiadania je potrebné zvoliť magnetovacie jarmo tak aby nedochádzalo k negatívnemu ovplyvňovaniu merania. Toto je možné zabezpečiť výberom vhodného typu materiálu ako aj rozmerov pre magnetovacie jarmo.

Pre magnetovacie jarmo bol zvolený feromagnetický materiál, ktorý má vysokú relatívnu permeabilitu, čiže malý magnetický odpor. Magnetický odpor jarma R_{mj} , by mal byť násobne menší ako magnetický odpor meranej vzorky R_{mv} .

V rámci magnetovacieho jarma sa nachádza nielen magnetovacie, ale aj snímačie vinutie. Vplyvom zmeny magnetickej indukcie v uzavretom magnetickom obvode dochádza k indukovaniu napätia v snímačej cievke, ktoré slúži na stanovenie magnetickej indukcie vo vzorke.

Ďalšou časťou meracej hlavice je snímačia cievka na snímanie Barkhausenovho šumu. Pretože Barkhausenov šum je stochastický proces, jeho frekvenčný obsah je bohatý na informácie a preto metódy získavania údajov a následného spracovania, napr. čas vzorkovania a filtrovanie, môže vážne ovplyvniť výsledný šumový signál.

Pre snímacie cievky je najjednoduchším prevedením vzduchová cievka, kedy je medený drôt navinutý v kruhovom tvare. Vzduchová cievka má však relatívne nízku citlivosť. Preto pridanie mäkkého magnetického feritového jadra do vnútra cievky vedie k lepšej citlivosti cievky. Využitie materiálu jadra s vysokou magnetickou permeabilitou v snímačej cievke dopomáha k zosilneniu snímaného Barkhausenovho šumu.

Na snímanie Barkhausenovho šumu má vplyv viacero parametrov snímačej cievky. Jedným z parametrov je citlivosť, kedy snímačia cievka s vyššou citlivosťou umožňuje detekciu menších zmien v magnetickom poli, čo vedie k presnejšiemu meraniu Barkhausenovho.

Ďalším parametrom je frekvenčná odozva. Barkhausenov šum obsahuje užitočné informácie v rozsahu frekvencií rádovo od jednotiek až do stoviek kHz. Preto je potrebné vytvorenie snímačej cievky ktorej rezonančná frekvencia je nad požadovaným frekvenčným rozsahom.

Aj samostatná geometria snímačej cievky vie výrazne ovplyvniť kvalitu snímaného Barkhausenovho šumu. V prípade veľkosti cievky sú väčšie (širšie) cievky schopné zachytiť šum z väčšej plochy materiálu, čo môže zvýšiť celkový signál, ale znížiť rozlíšenie, pretože šum je priemerovaný cez väčšiu oblasť. Naopak, menšie cievky poskytujú lepšie rozlíšenie. Tie zachytávajú šumové napätie z menšej, čiže presnejšie definovanej oblasti.

Snímaciu cievku je potrebné umiestniť v mieste, kde sa charakter magnetizácie k homogénnemu aspoň čo najviac približuje. Z uvedeného vyplýva, že aj samotné umiestnenie snímačej cievky vie ovplyvniť meranie Barkhausenovho šumu.

Snímačia cievka na snímanie Barkhausenovho šumu bola navrhovaná s integrovaným feritovým jadrom. V rámci nášho návrhu boli brané do úvahy vyššie spomínané aspekty. Hľadaný bol kompromis medzi citlivosťou a rezonančnou frekvenciou snímačej cievky. Navrhli sme a vyrobili rôzne typy snímacích cievok, ktoré sa odlišujú rozmermi a počtom závitov. Tabuľka 6.1 poskytuje porovnanie kľúčových parametrov jednotlivých vyhotovení týchto snímacích cievok.

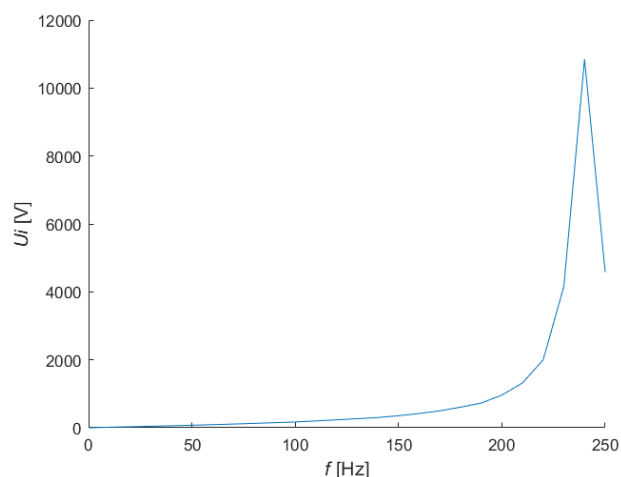
Tabuľka 6.1: Porovnanie parametrov snímacích cievok.

Typ snímačej cievky	Rozmery		Počet závitov [-]
	Výška [mm]	Priemer jadra [mm]	
A	20	3	500
B	20	3	200
C	20	3	250
D	18	3	250
E	15	3	250

Počas návrhu ako prvý z aspektov bola riešená citlivosťou, kedy bola vyhotovená snímačia cievka Typ A. Snímačia cievka vykazovala vysokú citlivosť. Následne sme sa začali zaoberať s frekvenčnou odozvou snímačej cievky. V rámci celého procesu bola využívaná meracia karta s maximálnou vzorkovacou frekvenciou 500kHz. Snímaný šumový signál bol pred vzorkovaním spracovaný dolnopriepustným filtrom s medznou frekvenciou 250kHz. V prípade ak by bola vlastná rezonančná frekvencia snímačej cievky Barkhausenovho šumu pod uvedenú hodnotu, mohlo by dôjsť k skresleniu tvaru spektra snímaného šumu. Na základe tejto skutočnosti bolo potrebné, aby vlastná rezonančná frekvencia snímačej cievky Barkhausenovho šumu bola nad uvedenou hodnotou. Po stanovení danej požiadavky bola zmeraná frekvenčná charakteristika

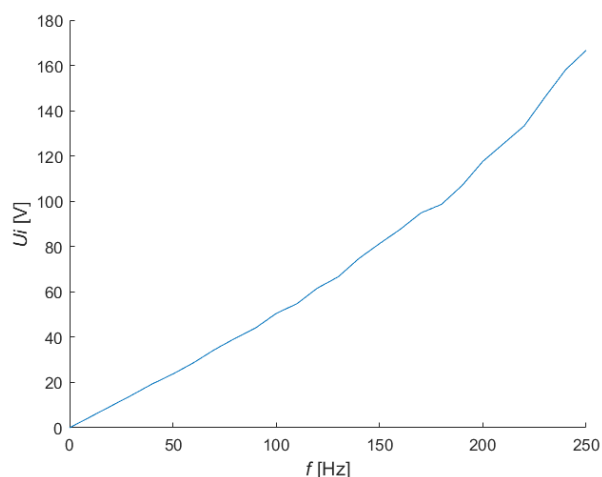
vytvorenej snímačej cievky.

Merania boli realizované pomocou Helmholtzových cievok. V prípade merania ideálnej cievky, ktorá nemá žiadne straty ani parazitné prvky, by závislosť indukovaného napätia na frekvencii mala byť lineárna v širokom frekvenčnom rozsahu. Reálna cievka však vykazuje odchýlky od ideálneho správania. Môže dôjsť k vzniku parazitných kapacít medzi závitmi cievky, ktoré pri vyšších frekvenciách spôsobujú rezonancie. Toto môže mať vplyv na celkovú impedanciu cievky, čo môže viesť k nelineárnemu správaniu a k poklesu indukovaného napätia.



Obr. 6.1. Frekvenčná charakteristika 500-závitovej snímačej cievky (Typ A).

Ako môžeme vidieť na Obr.6.1, charakteristika reálnej snímačej cievky nie je lineárna a často vykazuje pokles efektivity pri vyšších frekvenciách v dôsledku rôznych strát a parazitných javov. Vyhodená snímacia cievka má rezonančnú frekvenciu v rámci nášho požadovaného frekvenčného rozsahu (pod 250 kHz). Táto cievka nespĺňala stanovené požiadavky, čo nás viedlo ku vytvoreniu ďalšej snímačej cievky. Bola vytvorená snímacia cievka Typ B.

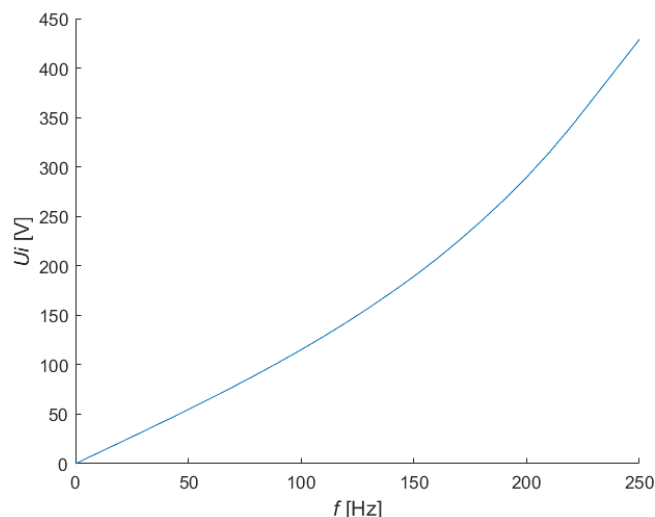


Obr. 6.2. Frekvenčná charakteristika 200-závitovej snímačej cievky (Typ B).

Vytvorená snímacia cievka síce spĺňa požadovaný minimálny frekvenčný rozsah, avšak daná cievka má výrazne nižšiu citlivosť. Na základe daných vytvorených snímačích cievok bolo jasné, že je potrebný počet závitov v rozmedzí od 200-500 a zároveň je potrebné dodržať minimálny frekvenčný rozsah.

Bola vytvorená tretia snímacia cievka, Typ C. Po vyhotovení danej cievky bola zmeraná jej

frekvenčná charakteristika.

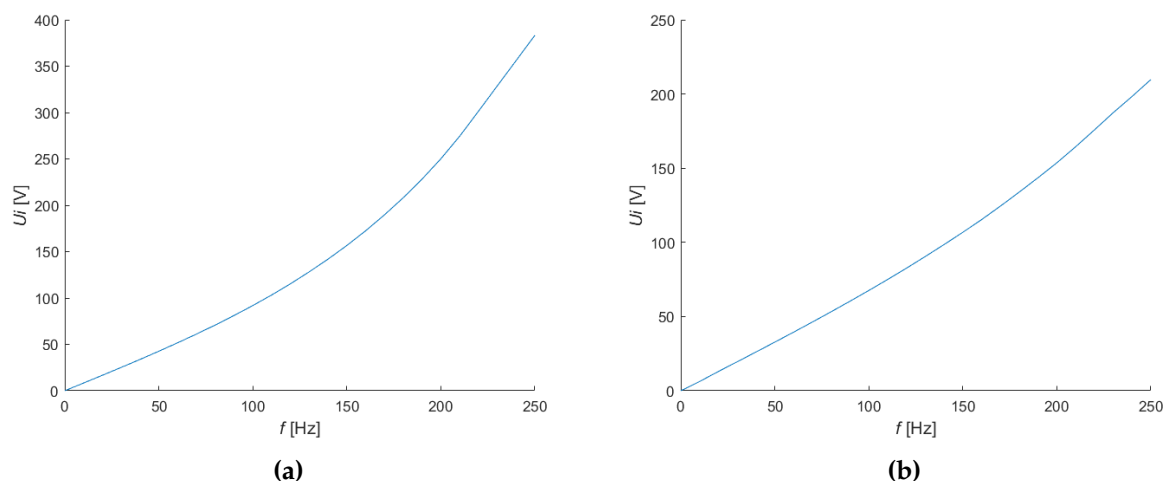


Obr. 6.3. Frekvenčná charakteristika 250-závitovej snímačej cievky s výškou 20mm (Typ C).

Vytvorené snímacie cievky obsahovali feritové jadro Ljn R 3x20-FN250 s priemerom 3mm. Vytvorené snímacie cievky boli vysoké 20mm.

Po vyhodnotení frekvenčnej charakteristiky, ktorú môžeme vidieť na Obr.6.3 je zrejmé, že daná cievka spĺňa obe naše stanovené požiadavky. Vyhotovená snímacia cievka Typ C má dostatočnú citlivosť a zároveň spĺňa aj požiadavku minimálneho frekvenčného rozsahu.

V ďalšom kroku bol sledovaný vplyv výšky snímačej cievky na jej parametre. Z daného dôvodu boli vytvorené ďalšie snímacie cievky, ktoré sa od predošlej líšili len výškou. Cievky s výškou 18mm (Typ D) a 15mm (Typ E).



Obr. 6.4. Frekvenčná charakteristika 250-závitovej snímačej cievky s výškou: (a) Typ D, (b) Typ E.

Z uvedených frekvenčných charakteristík je vidieť, že všetky vyhotovené výšky spĺňali podmienku minimálneho frekvenčného rozsahu. Je však vidieť, že najvyššiu citlivosť má snímacia cievka s výškou 20mm (Typ C). Na základe vyhotovených snímacích cievok a vyhodnotených frekvenčných charakteristík bola pri návrhu meracej hlavice použitá snímacia cievka Typ C.

Zariadenia na snímanie Barkhausenovho šumu sa v rámci jednotlivých laboratórií môžu výrazne líšiť. Rozdiely môžu byť v rozmeroch magnetizačného jarma, snímačej cievky, ako aj

v počte závitov magnetizačnej či snímačnej cievky. Na základe tejto skutočnosti je zrejmé, že porovnanie meraní medzi jednotlivými laboratóriami je problematické. Pre reprodukovateľnosť meraní, ako aj možnosť porovnávania výsledkov nameraných medzi jednotlivými laboratóriami je potrebné, aby boli merania vykonávané za definovaných podmienok. V praxi sa jednou z viacerých možností používa meranie pri definovanom časovom priebehu intenzity magnetického poľa. Pri komerčne dostupných sondách však obvykle nebýva snímaná intenzita magnetického poľa.

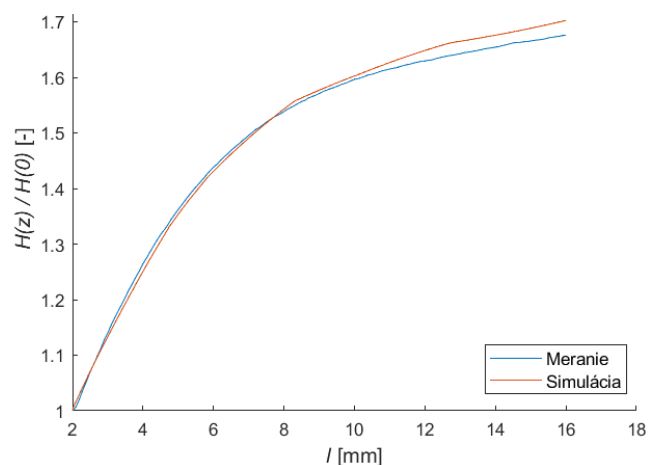
Táto skutočnosť nás viedla ku snahe vytvoriť prenosnú kompaktnú meraciu sondu s ktorou bude možné aj snímanie intenzity magnetického poľa. Na daný účel je najjednoduchší spôsob snímania intenzity magnetického poľa vo vzorke pomocou Hallovhovho snímača priloženého na povrch vzorky. Avšak pri takomto meraní dochádza k značnej chybe merania. Tu nastáva priestor pre spresnenie merania, ktoré je možné dosiahnuť použitím viacerých snímačov umiestnených v rôznych výškach nad vzorkou.

Magnetické pole pod meranou vzorkou a zároveň medzi pólmi magnetovacieho jarma bolo analyzované v programe ANSYS. Analýza bola realizovaná pomocou numerickej metódy, a to pomocou metódy konečných prvkov. V programe ANSYS bol nami vytvorený vlastný materiál pre meranú vzorku.

Vybraná bola vzorka konštrukčnej ocele 12050, ktorej sme pomocou meracej aparatury zmerali krivku prvotnej magnetizácie. Vzhľadom na skutočnosť, že program ANSYS umožňuje nahrať vlastnej B-H charakteristiky, odmeraná krivka prvotnej magnetizácie vybranej vzorky konštrukčnej ocele 12050 bola využitá na definovanie vlastného materiálu.

Po analýze v programe bolo realizované meranie intenzity magnetického poľa pod meranou vzorkou na overenie výsledkov. Použitý bol Hallov snímač, ktorého púzdro má približne 4mm, pričom Hallov snímač sa nachádza v strede púzdra. Keďže daný snímač je umiestnený v strede púzdra, to znamená, že aj v prípade priloženia Hallovhovho snímača do tesnej blízkosti vzorky je meraná intenzita poľa až 2mm od povrchu vzorky.

Po uskutočnení meraní bol na vyhodnotenie nameraných dát použitý softvér Matlab. Aby sme dosiahli presnejšie porovnanie medzi nameranými údajmi a údajmi zo simulácie, normalizovali sme všetky priebehy na hodnotu intenzity magnetického poľa na povrchu vzorky. Tento proces zabezpečuje jednotnosť referenčných hodnôt, čím sa eliminuje variabilita spôsobená rozdielmi v absolútnych hodnotách medzi meranými a simulovanými údajmi, čo umožňuje konzistentnejšie a spoľahlivejšie porovnanie výsledkov.



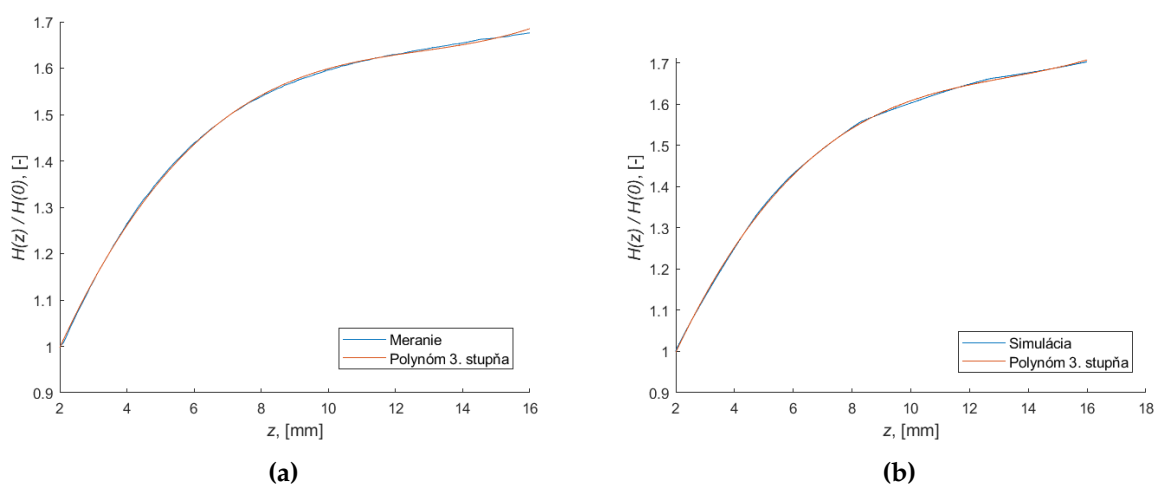
Obr. 6.5. Porovnanie intenzity magnetického poľa.

Na obrázku Obr.6.5 vidieť porovnanie intenzity magnetického poľa pod vzorkou medzi meraním a simuláciou. Je vidieť, že simulácia a meranie majú rovnaký charakter priebehu. Dáta z merania ako aj simulácie boli aproximované pomocou polynómu tretieho stupňa.

Polynóm tretieho stupňa má všeobecný tvar:

$$p(x) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (6.1)$$

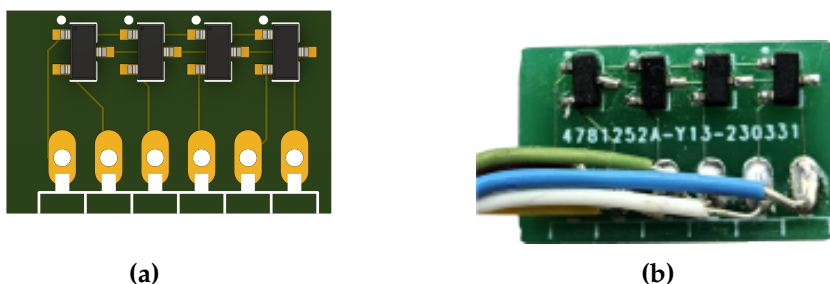
kde a_3 , a_2 , a_1 a a_0 sú koeficienty polynómu, ktoré je potrebné určiť, aby polynóm optimálne aproximoval zadané údaje. Koeficienty tohto polynómu boli získané pomocou metódy najmenších štvorcov, ktorá zabezpečuje minimalizáciu celkovej chyby medzi aproximovaným polynómom a skutočnými hodnotami.



Obr. 6.6. Aproximácia intenzity magnetického poľa: a) meranie, b) simulácia.

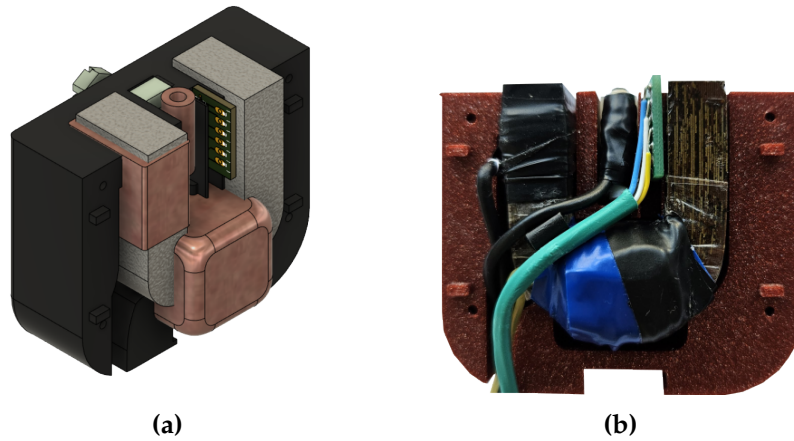
Porovnanie potvrdilo, že priebeh intenzity magnetického poľa pod meranou vzorkou je možné aproximovať pomocou polynómu tretieho stupňa.

Pre aproximáciu priebehu intenzity magnetického poľa polynómom tretieho stupňa budeme potrebovať údaje o intenzite magnetického poľa v štyroch bodoch. V rámci danej časti sme s miernou úpravou rozmerov dosky plošných spojov aplikovali návrh, ktorý sme už rozoberali v kapitole 5.



Obr. 6.7. (a) Upravený návrh dosky plošných spojov, (b) reálne prevedenie dosky plošných spojov s osadenými Hallovými snímačmi intenzity.

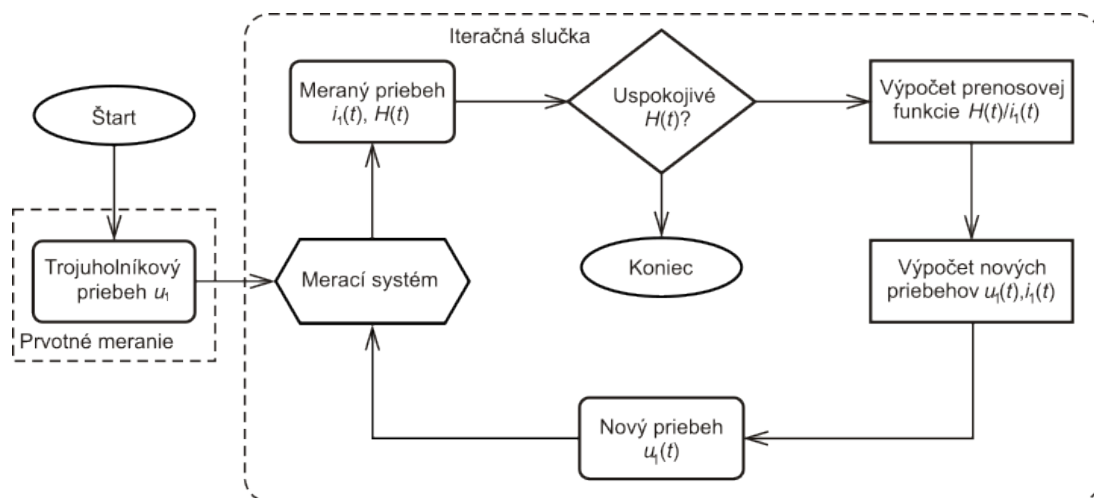
Po vyhotovení jednotlivých častí bolo potrebné ich integrovať do jedného kompaktného púzdra. Daný návrh púzdra sme realizovali 3D modelovaním v programe Fusion 360 a následne vyhotovili pomocou 3D tlačne.



Obr. 6.8. Kompaktná meracia hlavica (a) návrh, (b) reálne vyhotovenie.

V prípade meraní už máme informáciu o priebehu intenzity magnetického poľa v okolí vzorky (pod vzorkou). Následne je potrebné zabezpečiť, aby priebeh intenzity magnetického poľa bol definovaného tvaru.

Na dosiahnutie definovaného tvaru intenzity magnetického poľa bola zvolená softvérová, teda digitálna spätná väzba. Činnosť algoritmu spočíva v porovnávaní aktuálneho priebehu intenzity magnetického poľa $\mathbf{H}(t)$ s požadovaným priebehom intenzity magnetického poľa (zvyčajne trojuholníkovým alebo sínusovým) a na základe toho postupne upravuje tvar vstupného napätia budiaceho obvodu $u_1(t)$. Pre dosiahnutie požadovaného priebehu intenzity magnetického poľa sa tento proces opakuje v rámci iteračnej slučky, kým sa nedosiahne predpísaná miera odchýlky aktuálneho priebehu intenzity magnetického poľa od požadovaného. Potrebné informácie na vstupe spätoväzobného algoritmu pre výpočet budiaceho napätia v ďalšom iteračnom kroku zahŕňajú v aktuálnom kroku vypočítaný priebeh budiaceho napätia pre ďalšiu iteráciu $u_1(t)$, meraný priebeh intenzity magnetického poľa $\mathbf{H}(t)$ ako aj meraný priebeh prúdu i v ďalšom iteračnom kroku. Teda pre výpočet budiaceho napätia v treťom iteračnom kroku je potrebný vypočítaný priebeh budiaceho napätia v druhom iteračnom kroku $u_1(t)$, meraný priebeh intenzity magnetického poľa $\mathbf{H}(t)$ ako aj meraný priebeh prúdu i treťom iteračnom kroku.



Obr. 6.9. Vývojový diagram digitálnej spätnej väzby.

Algoritmus digitálnej spätnej väzby bol realizovaný ako samostatný merací cyklus, ktorý sme rozdelili do troch častí. Prvá časť zahŕňa generovanie budiaceho napätia. Druhá časť pozostáva

z merania a spracovania potrebných priebehov intenzity magnetického poľa $\mathbf{H}(t)$ a priebehu prúdu i . Hlavná tretia časť obsahuje úpravu meraných priebehov a výpočet požadovaného priebehu budiaceho napätia potrebného pre dosiahnutie požadovaného priebehu intenzity magnetického poľa $\mathbf{H}(t)$. Prvá a druhá časť daného meracieho cyklu je realizovaná rovnako v prípade merania bez digitálnej spätnej väzby, čomu sme sa už venovali v kapitole 2.2.

Algorizmus digitálnej spätnej väzby je založený na porovnávaní aktuálneho priebehu intenzity magnetického poľa $\mathbf{H}(t)$ s požadovaným, preto je potrebné, aby porovnávané priebehy mali rovnaký fázový posun. Vstupnú úpravu priebehov sme realizovali posunom priebehov do ich maxima, čím sme získali fázovo posunuté priebehy. Ďalej je generovaný referenčný priebeh intenzity magnetického poľa $\mathbf{H}_r(t)$ s rovnakou fázou a amplitúdou, ako je meraný priebeh intenzity magnetického poľa $\mathbf{H}(t)$. Porovnaním priebehov intenzity magnetického poľa získame odchýlku meraného priebehu intenzity magnetického poľa od požadovaného.

Výpočet odchýlky δ_H je založená na určení percentuálneho podielu odchýlky skutočného od požadovaného tvaru priebehu intenzity magnetického poľa vyjadrenej v percentách

$$\delta_H = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(H_{m,i} - H_{r,i})|}{H_{max}} \cdot 100\% \quad (6.2)$$

kde N je počet vzoriek v rámci jednej periódy, $H_{m,i}$ je i -tá vzorka meraného signálu a $H_{p,i}$ je i -tá vzorka požadovanej závislosti $H(t)$, H_{max} je vrcholová hodnota požadovaného priebehu.

Na výpočet potrebného tvaru priebehu budiaceho napätia pre dosiahnutie požadovaného tvaru intenzity magnetického poľa sme na úpravu vstupných signálov použili derivovanie a integrovanie daných priebehov. Ako bolo už spomenuté v časti ??, merací systém využíva budiaci signál v rozmedzí hodnôt ± 1 , tak aj v tomto prípade boli priebehy normalizované na maximálnu hodnotu amplitúdy ± 1 . Normované priebehy boli upravené pomocou derivácie. Po úprave derivovaných priebehov sme pomocou integrácie získali upravený priebeh budiaceho napätia $u_{vyp}(t)$.

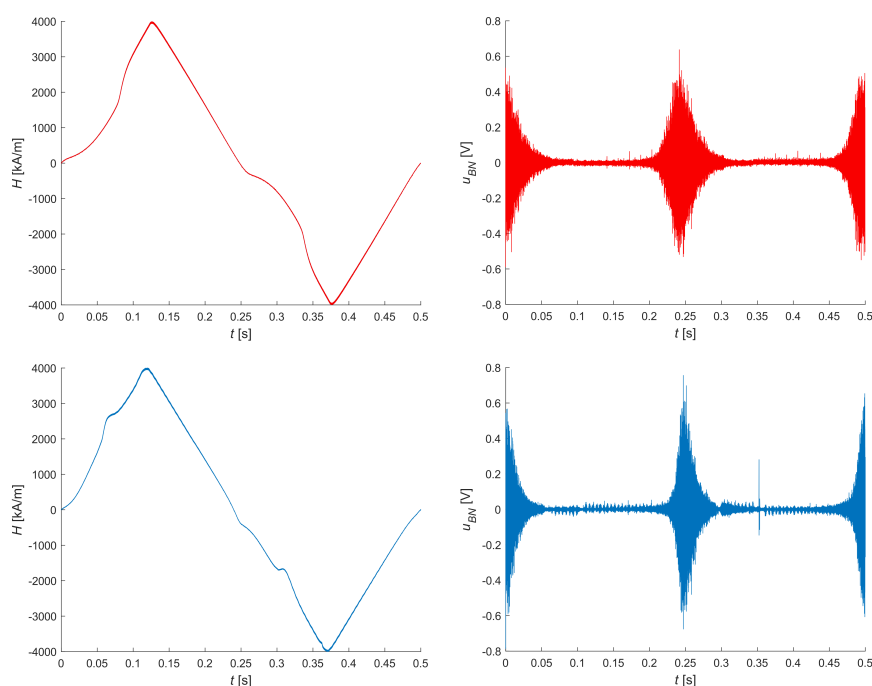
Ďalšou úpravou signálu na zlepšenie výkonnosti algoritmu je trimovanie, kedy priebeh budiaceho napätia $u_{vyp}(t)$ sme ešte spracovali pomocou trimovania. Takto upravený signál budiaceho napätia je jedným z potrebných signálov pre realizáciu ďalšej iterácie spätoväzobného algoritmu. Pre zlepšenie výkonnosti a stabilizácie nášho algoritmu boli do neho zaradené rozličné metódy, ktoré pomáhajú so stabilizáciou algoritmu digitálnej spätnej väzby. Jedným z metód je vytvorenie a zaradenie časti algoritmu umožňujúceho opakovanie najlepšieho priebehu budiaceho napätia. Používateľ definuje veľkosť intervalu opakovania, ktorý vyjadruje počet opakovaní ktoré musia uplynúť pred použitím najlepšieho priebehu budiaceho napätia. To znamená, že v prípade nastavenej hodnoty interval opakovania na hodnotu 2 bude každá tretia iterácia realizovaná pomocou doposiaľ získaného najlepšieho priebehu budiaceho napätia.

Používateľ vie vytvorený algoritmus digitálnej spätnej väzby riadiť pomocou parametrov ako maximálna prípustná odchýlka intenzity magnetického poľa od ideálneho priebehu, počet opakovaní cyklu spätoväzobného algoritmu (iterácie), ako aj množina trimovania. Nakonci algoritmu je porovnaná vypočítaná odchýlka δ_H od najlepšie dosiahnutej odchýlky počas predošlých iterácií. Podobne je ukladaný aj najlepší priebeh intenzity magnetického poľa H , ako ja najlepší priebeh budiaceho napätia.

Pri implementácii algoritmu digitálnej spätnej väzby bolo potrebné upravenie časti programu, a to generovanie budiaceho priebehu. Úprava spočíva v tom, že v prípade spustenie algoritmu

digitálnej spätnej väzby sa na generovanie budiaceho napätia v prvej iterácii použije pôvodné generovania budiaceho napätia, ktorému sme sa bližšie venovali v časti ???. Pre ďalšie iterácie sa použije vypočítané budiace napätie v predošlej iterácii algoritmu digitálnej spätnej väzby. V prípade meraní viacerých vzoriek za sebou nastával problém, že pri opakovanom spustení algoritmu digitálnej spätnej väzby nám ostali zapamätané najlepšie priebehy a najlepšia odchylka. Keďže algoritmus digitálnej spätnej väzby využíva opakovanie najlepšieho priebehu budiaceho napätia to znamená, že aj počas merania ďalšej vzorky sa v rámci cyklu úpravy budiaceho napätia pre dosiahnutie požadovaného priebehu intenzity magnetického poľa využívali už zapamätané najlepšie zapamätané priebehy z úpravy predchádzajúcej vzorky. Pre tieto prípady bola doplnená možnosť vymazania najlepších priebehov a najlepšie odchýlky. Funkciu spätnoväzbového algoritmu ilustruje meranie na vzorke ocele 12020 Obr. 6.10. Porovnaný priebeh intenzity magnetického poľa počas merania bez digitálnej spätnej väzby (červená) a s digitálnou spätnou väzbou (modrá). Priebeh intenzity magnetického poľa bez spätnej väzby prislúcha aj priebehu intenzity magnetického poľa v nultom iteračnom kroku realizácie spätnoväzobného algoritmu. V rámci merania si používateľ vie nastaviť požadovanú odchýlku pod ktorú sa chce dostať. Počas merania zobrazeného na Obr. 6.10 bola nami stanovená hodnota odchýlky $\delta_H = 3\%$.

Namerané priebehy Barkhausenovho šumu sú porovnané na Obr. 6.10. Je vidieť, že aj relatívne malé odchýlky tvaru priebehu $H(t)$ spôsobujú výrazné zmeny v odozve Barkhausenovho šumu. Preto je dôležité, aby boli počas merania dodržiavané predpísané podmienky reprodukovateľnosti meraní.



Obr. 6.10. Porovnanie počiatočného a výsledného tvaru vlny $H(t)$ a príslušných šumových napätí BN.

Záver

V úvode dizeračnej práce sú zhrnuté základné poznatky o látkach s usporiadanou magnetickou štruktúrou (feromagnetiká, antiferomagnetiká a ferimagnetiká) a magnetizačnej krivke. V ďalšej časti dizeračnej práce sme sa zamerali na opis vybraných metód nedeštruktívnej defektoskopie. Cieľom bolo zameranie sa na magnetické metódy nedeštruktívnej defektoskopie, konkrétnejšie na analýzu pomocou Barkhausenovho šumu. V práci sú prezentované aktuálne poznatky o danej problematike, obohatené o praktické aplikácie tejto metódy.

Demonštrovali sme schopnosť uvedeného meracieho systému merania a analýzy magnetizačných charakteristík a Barkhausenovho šumu vykonaných na vybraných vzorkách konštrukčných ocelí. Optimalizovaný merací systém umožňuje pomocou zavedenia digitálnej sätnej väzby budenie pri definovanom trojuholníkovom tvare priebehu intenzity magnetického poľa H . Bola vyvinutá prvá verzia spätnoväzobného algoritmu. Merací systém je v súčasnosti stále vo fáze vývoja a zdokonaľovania, pričom sa pracuje na novej, upravenej a optimalizovanej verzii spätnoväzobného algoritmu.

V rámci analýzy výsledkov meraní vykonaných na vybraných vzorkách konštrukčných ocelí bol zavedený nový parameter Barkhausenovho šumu f_c , reprezentujúci ťažisko spektra.

Podarilo sa nám vytvoriť aj systém Hallových sond, ktorý umožňuje presnejšie stanovenie intenzity magnetického poľa pri meraniach na otvorených vzorkách.

Zaoberali sme sa vývojom a optimalizáciou meracích sond na snímanie Barkhausenovho šumu na otvorených vzorkách. Zamerali sme sa na návrh a implementáciu meracích sond do jedného kompaktného púzdra. Vytvorili sme jednotlivé moduly, ktoré sme následne integrovali do jedného púzdra. Po ich vytvorení sme prešli na návrh púzdra pomocou 3D modelovania v programe Fusion 360. Pomocou 3D tlače sme vyhotovili navrhnuté púzdro do ktorého sme následne integrovali jednotlivé moduly.

Zoznam publikácií autora

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

V2_01

HILKO, Karol - JANČÁRIK, Vladimír. Design of the digital hysteresisgraph. In *Electro-mechanical systems application in industry 2018 : Zliechov, Slovakia. August 28-31, 2018*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, s. 31-34. ISBN 978-80-227-4870-4. Kategória publikácie do 2021: AFD.

V2_02

HILKO, Karol. Multifunctional hysteresis loop and Barkhausen noise recorder. In *ELITECH '21 [elektronický zdroj] : 23rd Conference of Doctoral Students, May 26, 2021*. 1. ed. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, [5] s. ISBN 978-80-227-5098-1. Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD.

V2_03

HILKO, Karol - ŠKARBALA, Daniel - JANČÁRIK, Vladimír. Influence of measurement condition on magnetic parameters of construction steel. In *APCOM 2022 : 27th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 22-24, 2022*. 1. ed. Melville: AIP Publishing, 2023, Art. no. 040009 [5] s. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4479-9 (2022: 0.164 - SJR). V databáze: DOI: 10.1063/5.0135902 ; SCOPUS: 2-s2.0-85160250768 ; WOS: 001055613400030. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD.

V2_04

JANČÁRIK, Vladimír - PALČEK, Peter - HILKO, Karol. Magnetic testing of ferritic stainless steel. In *APCOM 2021 : 26th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 23-25, 2021*. 1. ed. Melville: AIP Publishing, 2021, Art. no. 050006 [5] s. ISBN 978-0-7354-4138-5. V databáze: DOI: 10.1063/5.0068499 ; SCOPUS: 2-s2.0-85118897978 ; WOS: 000859097600059. Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD.

V2_05

JANČÁRIK, Vladimír - HILKO, Karol. Complex system for analysis of magnetic properties of steels. In *Electro-mechanical systems application in industry 2022 : Zliechov, Slovakia. August 23-26, 2022*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2022, s. 39-42. ISBN 978-80-227-5280-0. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD.

V2_06

JANČÁRIK, Vladimír - PALČEK, Peter - HILKO, Karol. Change in magnetic properties of low carbon steel after heat treatment. In *APCOM 2022 : 27th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 22-24, 2022*. 1. ed. Melville: AIP Publishing, 2023, Art. no. 040012 [4] s. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4479-9 (2022: 0.164 - SJR). V databáze: DOI: 10.1063/5.0135905 ; SCOPUS: 2-s2.0-85160276937 ; WOS: 001055613400031. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD.

V2_07

KAMENSKÝ, Miroslav - HILKO, Karol - BITTERA, Mikuláš - KRÁLIKOVÁ, Eva. Employing LabVIEW web service in design of application twins with remote access. In *Measurement 2023 : 14th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia. May 29-31, 2023*. Bratislava: Slovak academy of sciences, 2023, s. 199-202. ISBN 978-80-972629-6-9. V databáze: IEEE: 10164593 ; SCOPUS: 2-s2.0-85165054164 ; DOI: 10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164593. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD.

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

V3_01

HILKO, Karol - JANČÁRIK, Vladimír - KAFKA, Filip. Determination of magnetic field intensity on open sample. In *Journal of Electrical Engineering*. Vol. 72, No. 6 (2021), s. 419-422. ISSN 1335-3632 (2021: 0.840 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.200 - SJR, Q4 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.2478/jee-2021-0060 ; WOS: 000754711600010. Kategória publikácie do 2021: ADN.

Literatúra

- [1] "Overview of nondestructive testing (ndt)," 2021. Available online: <https://inspectioneering.com/tag/nondestructive+testing>.
- [2] "Nondestructive testing," 2021. Available online: <https://www.gom.com/en/topics/nondestructive-testing>.
- [3] "Introduction to nondestructive testing," 2021. Available online: https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction_to_Nondestructive_Testing.aspx.
- [4] "What is ndt?," 2021. Available online: <https://www.icndt.org/What-is-NDT/>.
- [5] V. Hajko, L. Potocký, and A. Zentko, *Magnetizačné procesy*. Bratislava: Alfa, 1982.
- [6] M. J. Sablik and B. Augustyniak, "Magnetic methods of nondestructive evaluation," in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Wiley, 2001.
- [7] A. Moses, H. V. Patel, and P. Williams, "Ac barkhausen noise in electrical steels: Influence of sensing technique on interpretation of measurements," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 57, pp. 3–8, 2006.
- [8] N. Chukwuchekwa, *Investigation of magnetic properties and Barkhausen noise of electrical steel*. PhD thesis, PhD Thesis, 2011.
- [9] E. Ušák, "Magnetization processes in ferromagnetic materials," 2017. Osobná komunikácia, Department of Electromagnetic Theory IEE, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia.
- [10] D. Jiles, "Review of magnetic methods for nondestructive evaluation," *NDT International*, vol. 21, pp. 311–319, 1988.
- [11] J. A. P. Benitez, T. L. Manh, and M. Alberteris, "5 - barkhausen noise for material characterization," in *Barkhausen Noise for Nondestructive Testing and Materials Characterization in Low-Carbon Steels* (T. L. Manh, J. A. P. Benitez, J. H. E. Hernández, and J. M. H. López, eds.), Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, pp. 115–146, Woodhead Publishing, 2020.
- [12] A. Stupakov, M. Neslušán, and O. Perevertov, "Detection of a milling-induced surface damage by the magnetic barkhausen noise," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 410, pp. 198–209, 2016.
- [13] A. Stupakov, O. Perevertov, and V. Zablotskii, "A system for controllable magnetic measurements of hysteresis and barkhausen noise," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 5, pp. 1087–1097, 2016.
- [14] V. Jančárik, P. Palček, and K. Hilko, "Magnetic testing of ferritic stainless steel," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2411, p. 050006, 2021.
- [15] B. Alessandro, C. Beatrice, G. Bertotti, and A. Montorsi, "Domain wall dynamics and barkhausen effect in metallic ferromagnetic materials. i. theory," *Journal of Applied Physics*, vol. 68, no. 6, pp. 2901–2907, 1990.
- [16] B. Alessandro, C. Beatrice, G. Bertotti, and A. Montorsi, "Domain wall dynamics and barkhausen effect in metallic ferromagnetic materials. ii. experiments," *Journal of Applied Physics*, vol. 68, pp. 2908–2915, 1990.
- [17] V. Jančárik, P. Palček, and K. Hilko, "Change in magnetic properties of low carbon steel

- after heat treatment," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2778, p. 040012, 2023.
- [18] "Navrhňte způsob žíhání materiálu arema/12 014.28/ pro dosažení vlastností vhodných pro střídavou magnetizaci," 2024. [Online]. [cit:2024-05-01].
- [19] A. Stupakov, "Stabilization of barkhausen noise readings by controlling a surface field waveform," *Measurement Science and Technology*, vol. 25, 2014.
- [20] A. Stupakov, "Dynamic normalization of the barkhausen noise signal," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 482, pp. 135–147, 2019.
- [21] X. Liu, R. Zhang, B. Wu, and C. He, "Quantitative prediction of surface hardness in 12cr-mov steel plate based on magnetic barkhausen noise and tangential magnetic field measurements," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 37, 2018.
- [22] K. Hilko, V. Jančárik, and F. Kafka, "Determination of magnetic field intensity on open sample," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 72, no. 6, pp. 419–422, 2021.
- [23] J. Grum and B. Pecnik, "Development and testing of new sensors for the study of magnetic barkhausen noise," *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 26, no. 1/2, p. 152, 2006.
- [24] S. Hillmann and N. Meyendorf, "A new barkhausen noise technique for applications at miniaturized geometries," in *AIP Conference Proceedings*, 2014.
- [25] N. P. Gaunkar, O. Kypris, I. Nlebedim, and D. Jiles, "Optimization of sensor design for barkhausen noise measurement using finite element analysis," *Journal of Applied Physics*, vol. 115, no. 17, 2014.