

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Lenka Hašková

Autoreferát dizertačnej práce

**Využitie analýzy neštandardných elektromagnetických parametrov
feromagnetických materiálov na nedeštruktívnu defektoskopiu materiálov**

na získanie akademického titulu „doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe: Meracia technika

v študijnom odbore: Elektrotechnika

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Bratislava, 13. januára 2026

Dizertačná práca bola vypracovaná na Ústave elektrotechniky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Predkladateľ Ing. Lenka Hašková
 Ústav elektrotechniky
 Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Elemír Ušák, PhD.
 Ústav elektrotechniky
 Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

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

 doc. Ing. Štefan Borik, PhD.
 Katedra teoretickej elektrotechniky a biomedicínskeho inžinierstva
 Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, Žilinská univerzita
 Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný.....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 26.2.2026 o 9:00 h
na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

.....
prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.
dekan fakulty

Anotácia

Názov práce: Využitie analýzy neštandardných elektromagnetických parametrov feromagnetických materiálov na nedeštruktívnu defektoskopiu materiálov

Kľúčové slová: nedeštruktívna defektoskopia, metódy nedeštruktívnej defektoskopie, magnetizmus, magnetické parametre, magnetizačné krivky

Abstrakt: Základným cieľom tejto práce je predovšetkým hľadanie korelácie medzi štandardnými (napr. koercitívne pole, remanentná indukcia), ale aj netradičnými, vhodne definovanými magnetickými hysteréznymi parametrami (napr. diferenciálna permeabilita) kovových feromagnetík a ich mikroštruktúrou s využitím pokročilých experimentálnych metód a teoretickej analýzy získaných údajov. Výhodou spomenutých metód je okrem relatívnej jednoduchosti a nízkych ekonomických nárokov aj (na rozdiel od niektorých tradičných metód nedeštruktívnej defektoskopie) schopnosť indikácie zmien vlastností materiálu ešte predtým, než sa prejavia v makroskopickom meradle. To poskytuje možnosť odhaliť problémy spojené s poškodením sledovaného objektu už v ranom štádiu vzniku defektu. Vynuté metódy môžu byť aplikované napr. na kvantifikáciu štrukturálnej degradácie nízkouhlíkových konštrukčných ocelí podrobených cyklickému mechanickému resp. tepelnému namáhaniu a simulovanému radiačnému poškodeniu ako aj na kvantitatívne posúdenie štrukturálnych zmien v oceľoch a nano-kryštalických magnetických zliatinách v rôznych fázach technologického procesu prípravy.

Annotation

Title: Utilization of analysis of non-standard electromagnetic parameters of the ferromagnetic materials for non-destructive inspection of materials

Keywords: non-destructive evaluation, methods of non-destructive evaluation, magnetism, magnetic parameters, magnetization curves

Abstract: The main goal of this study is to find the correlation between standard (e.g., the coercive field, the remanent flux density) but also unconventional properly defined magnetic hysteresis parameters (e.g., differential permeability) of metallic ferromagnets and their microstructure using advanced experimental methods and theoretical analysis of obtained data. In addition to the relative simplicity and low economic demands, these methods have the advantage (unlike some traditional non-destructive defectoscopy methods) of being able to indicate changes in material properties before they appear on a macroscopic scale. This provides the opportunity to detect problems associated with damage to the object at an early stage of the defect being arose. The developed methods can be applied, e.g., for quantifying the structural degradation of low carbon structural steels subjected to cyclic mechanical or thermal stress and simulated radiation damage as well as a quantitative assessment of structural changes in steels and nano-crystalline magnetic alloys at various stages of the technological process.

Obsah

1	Tézy dizertačnej práce	1
2	Stručný úvod do problematiky	2
3	Metóda magnetického adaptívneho testovania	4
3.1	Teoretický princíp MAT metódy	4
3.2	Meracia aparátúra	7
3.3	Postup pri meraní	8
3.4	Spôsob vyhodnocovania nameraných údajov	9
4	Vyvíjaný softvér na analýzu nameraných magnetických parametrov	12
4.1	Prvá fáza vývoja softvéru pomocou prostredia LabVIEW	12
4.2	Druhá fáza vývoja softvéru pomocou prostredia Matlab	13
4.3	Rozšírenie možností vyhodnotenia nameraných údajov v prostredí Matlab	14
4.3.1	Vyhladenie údajov v maticiach	15
4.3.2	Korelačné koeficienty	15
5	Vyhodnotenie experimentálnych meraní na magneticky uzatvorených vzorkách	16
5.1	Vzorka žihaná pri rôznych teplotách	17
5.2	Vzorka žihaná rôzne dlhý čas	20
6	Vyhodnotenie experimentálnych meraní na magneticky otvorených vzorkách	24
6.1	Výšetrovanie vzťahu medzi magnetizujúcim prúdom a intenzitou magnetického poľa vo vzorke	25
6.2	Výšetrovanie vzťahu medzi magnetickým tokom vo vzorke a v jarme	27
	Záver	30
	Zoznam publikácií autora	33
	Literatúra	35

1 Tézy dizertačnej práce

V rámci zadanej témy boli špecifikované nasledujúce tézy.

- Vývoj softvérového nástroja pre analýzu nameraných dát, ktorého súčasťou je skúmanie zvolených elektromagnetických parametrov (najmä diferenciálnej permeability). Súčasťou je testovanie lineárnosti (resp. korelácie) zmeny parametra po aplikácii záťaže na skúmaný materiál.
- Súčasne s testovaním lineárnosti zvoleného parametra bude prínosné aj testovanie na iné typy závislostí, teda ľubovoľný tvar krivky. Vhodné bude napríklad aj použitie Pearsonovho korelačného koeficientu pre porovnanie závislostí diferenciálnej permeability a iných veličín, získaných tradičnými nedeštruktívnymi, ale aj deštruktívnymi metódami.
- Overenie použitia meracej aparatury a jej prispôsobenie pre meranie na magneticky otvorených vzorkách. Doposiaľ boli merania robené len na magneticky uzatvorených vzorkách kvôli eliminácii rôznych systematických chýb, spôsobených napr. existenciou demagnetizačného poľa, vplyvom rôznej geometrie magnetického obvodu a pod. Keďže dostupnosť takýchto vzoriek je, najmä v súčasnosti, problematická, vhodné bude meranie na omnoho dostupnejších Charpyho vzorkách (vzorky v tvare hranolov štandardizovaných rozmerov $(10 \times 10 \times 55 \text{ mm})$ s vytvoreným vrubom v tvare písmena „v“).
- Analýza nameraných údajov získaných meraním na magneticky otvorených vzorkách. Overenie možnosti použitia MAT metódy aj pre otvorené vzorky, k čomu je potrebné skúmanie vzťahu medzi magnetizačným prúdom a intenzitou magnetického poľa vo vzorke a tiež skúmanie vzťahu medzi magnetickým tokom vo vzorke a v jarme.

2 Stručný úvod do problematiky

Nedeštruktívna defektoskopia materiálov je dôležitou disciplínou v modernom priemysle, kde zohráva kľúčovú úlohu pri zabezpečovaní bezpečnosti, spoľahlivosti a výkonnosti materiálov a komponentov používaných v rôznych aplikáciách. S rastúcimi nárokmi na kvalitu a spoľahlivosť produktov sa potreba efektívnych metód kontroly neustále zvyšuje. Tradičné metódy defektoskopie, ako napríklad vizuálne skúšanie, ultrazvukové testovanie alebo rádiografické skúšanie, majú svoje obmedzenia. Môžu byť časovo náročné, finančne vyčerpávajúce alebo dokonca deštruktívne, čo sťažuje ich praktické nasadenie v niektorých priemyselných odvetviach. Preto sa záujem v posledných rokoch čoraz viac presúva na nedeštruktívne metódy testovania, ktoré umožňujú identifikovať defekty bez akéhokoľvek poškodenia testovaného materiálu [1].

Táto práca sa zaoberá najmä magnetickou adaptívnou metódou testovania známou pod názvom Magnetic Adaptive Testing (MAT), ktorá je založená na skúmaní magnetických parametrov feromagnetických materiálov získaných z magnetizačných kriviek, meraných pri špecifických podmienkach magnetizovania testovanej vzorky. MAT umožňuje skúmanie mikroštruktúrnych defektov a tiež je pomocou nej možné odhaliť aj únavu materiálu. MAT je modernou metódou, ktorá sa neustále vyvíja a ponúka priestor pre ďalšie skúmanie a zlepšovanie a má veľký potenciál pre využitie v praxi.

Magnetické vlastnosti materiálov vyplývajú z vnútorného usporiadania atómov a správania elektrónov v prítomnosti magnetického poľa. Ich pochopenie je nevyhnutné pre interpretáciu magnetických javov a experimentálnych metód využívaných v tejto práci. Elektromagnetické pole je charakterizované veličinami ako elektrická a magnetická intenzita, magnetická indukcia, magnetizácia a magnetická polarizácia, ktoré popisujú interakciu poľa s látkou.

Výsledné magnetické vlastnosti látky sú dané magnetickými momentmi atómov, pričom dominantný príspevok pochádza od orbitálneho a spinového magnetického momentu elektrónov. Vektorovým súčtom magnetických momentov jednotlivých elektrónov vzniká výsledný magnetický moment materiálu. Na základe interakcie s vonkajším magnetickým poľom sa látky delia na diamagnetické, paramagnetické, feromagnetické, antiferomagnetické a ferimagnetické.

Základnými parametrami charakterizujúcimi magnetické materiály sú magnetická susceptibilita, permeabilita, Curieho teplota, saturačná magnetizácia, remanencia a koercivita. Tieto veličiny opisujú odozvu materiálu na magnetické pole, jeho schopnosť udržať magnetizáciu a energetické straty pri magnetizačných procesoch. Vzťah medzi magnetickou indukciou a intenzitou magnetického poľa je znázornený hysteréznou slučkou, ktorá poskytuje informácie o správaní materiálu pri opakovanom magnetizovaní a demagnetizovaní.

3 Metóda magnetického adaptívneho testovania

Metóda magnetického adaptívneho testovania (MAT) je založená na skúmaní magnetizačných kriviek pri špecifických magnetizačných podmienkach. Pomocou tejto metódy je možné skúmať mikroštruktúralne defekty aj v rozmeroch nanometrov. Je dokonca možné odhaliť únavu materiálu spôsobenú rôznymi typmi namáhania pred tým, než sa prejaví ako viditeľné poškodenie. MAT metóda sa prispôsobuje skúmanému materiálu aj analyzovaným štruktúrnym zmenám vzorky, keďže pri spracovaní dát vždy využíva ten rozsah meraní, ktorý najcitlivejšie reaguje na daný materiál a jeho konkrétnu štruktúrnú zmenu. Optimálne zvolené prvky vhodne definovaných matíc magnetických parametrov, založené na meraní skupín minoritných hysteréznych slučiek, vykazujú vyššiu citlivosť než ktorýkoľvek z tradičných parametrov získaných z hysteréznej slučky pri saturačnej amplitúde. Z toho dôvodu pre získanie optimálnych prvkov, nie je potrebné vzorky merať až do saturačnej hodnoty, ale len do vopred stanovenej nižšej magnetizačnej hodnoty, [2].

3.1 Teoretický princíp MAT metódy

Princíp MAT metódy spočíva v skúmaní magnetizačnej krivky – hysteréznej slučky, ktorá opisuje vzťah magnetickej indukcie B a magnetickej intenzity H . Túto krivku možno chápať ako parametrickú, pričom čas t je parameter určujúci polohu konkrétneho bodu magnetizačnej krivky v dvojrozmernom HB -priestore (H_k, B_k) , zodpovedajúcu časovému okamihu t_k . Jedným z dôležitých parametrov používaných na opis magnetických vlastností magnetických materiálov je diferenciálna permeabilita $\mu_{\text{diff}}(H_k, B_k)$,

definovaná vo všeobecnosti ako dotyčnica ku magnetizačnej krivke v danom špecifickom pracovnom bode.

$$\mu_{\text{diff}}(t = t_k) = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB(t)}{dH(t)} \bigg|_{\substack{H = H_k \\ B = B_k}} \quad (3.1)$$

Použitý parameter μ_0 je permeabilita vákua a $H_k = H(t = t_k)$ a $B_k = B(t = t_k)$. Dôvodom použitia diferenciálnej permeability ako hodnotiaceho parametra je jej preukázaná vysoká citlivosť na mikroštrukturálne zmeny vyvolané rôznymi druhmi namáhania (tepelné, mechanické, radiačné), ktoré môže byť dlhodobé, resp. mnohokrát opakované, čím dochádza k postupnej degradácii štruktúry (tzv. únava materiálu). Podstatnou skutočnosťou, ktorú využíva MAT metóda je, že permeabilita (príp. susceptibilita) pri nelineárnych hysteréznych parametroch nie je konštantou. MAT metóda teda skúma diferenciálnu permeabilitu v rôznych pracovných bodoch 2D HB -priestoru. Hlavnou myšlienkou MAT metódy je magnetizovanie testovanej vzorky po častiach lineárnym budiacim signálom $H(t)$ (napríklad trojuholníkovým). Pri použití času t ako parametra môže byť vzťah č. 3.1 upravený nasledovne:

$$\mu_{\text{diff}}(t) = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB(t)}{dH(t)} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\frac{dB(t)}{dt}}{\frac{dH(t)}{dt}}. \quad (3.2)$$

Výraz v čitateli hlavného zlomku priamo súvisí s indukovaným napätím, pretože platí Faradayov indukčný zákon, vyjadrený pomocou Maxwellových rovníc ako

$$u_{\text{ind}}(t) = N_s A \frac{dB(t)}{dt}. \quad (3.3)$$

Ak navyše zabezpečíme, aby časová zmena budiaceho magnetického poľa s intenzitou H bola konštantná, t.j.

$$\left| \frac{dH(t)}{dt} \right| = c_H, \quad (3.4)$$

potom je diferenciálna permeabilita $\mu_{\text{diff}}(t)$ priamo úmerná indukovanému napätiu $u_{\text{ind}}(t)$ (teda ju vlastne priamo meriame) a nie je potrebné ju pracne počítať z nameraných časových priebehov ako numerickú deriváciu,

kde je nevýhodou najmä citlivosť na šum.

$$\mu_{\text{diff}}(t) = \frac{1}{\mu_0} \frac{\frac{dB(t)}{dt}}{\frac{dH(t)}{dt}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\frac{dB(t)}{dt}}{c_H} = \frac{1}{\mu_0 N_s A c_H} |u_{\text{ind}}(t)|. \quad (3.5)$$

N_s je počet závitov na sekundárnom vinutí a A je plocha priečného prierezu vzorky, ktorou za normálnych podmienok prechádza veľká časť magnetického toku. V súlade so vzťahom č. 3.5 je možné z indukovaného napätia jednoducho vypočítať diferenciálnu permeabilitu zodpovedajúcu akémukoľvek časovému okamihu ako priamo úmernú. Spôsob ako nájsť vhodný priebeh budiaceho poľa $H(t)$ je použitím ďalšieho základného pravidla a to Ampèrovho zákona (rozšírený J.C. Maxwellom pridaním tzv. posuvného prúdu, ktorý nie je spôsobený pohybom voľných nosičov nábojov, ale zmenou elektrických polí), ktorý spája časovo premenlivé vektory intenzity magnetického poľa $\mathbf{H}(t)$ a prúdovej hustoty $\mathbf{J}(t)$.

$$\oint_C \mathbf{H}(t) \bullet d\mathbf{r} = \iint_S \mathbf{J}(t) \bullet d\mathbf{S} \quad (3.6)$$

Vľavo je krivkový integrál po uzavretej dráhe C a vpravo je plošný integrál nad oblasťou S ohraničenou krivkou C . Ak je uzavretá dráha zvolená tak, že vektory intenzity poľa a element dráhy $d\mathbf{r}$ sú vždy kolineárne, veľkosť intenzity poľa je konštantná, prúdová hustota sa nemení vzhľadom na priestorové súradnice a je vždy kolmá na lokálny element plochy $d\mathbf{S}$ (napr. pre rovný drôt je správnu voľbou dráhy C jednoducho kruh s polomerom r ; vďaka kruhovej symetrii intenzity magnetického poľa $\mathbf{H}(t)$ generovanej prúdom $i(t)$ pretekajúcim týmto drôtom je amplitúda intenzity pre dané r konštantná), vzťah č. 3.6 môže byť prepísaný do skalárnej podoby ako

$$H(t) 2\pi r = N_p i(t), \quad (3.7)$$

kde $2\pi r$ je dĺžka kruhovej dráhy C , N_p je počet primárnych závitov (budiacej cievky). Vo výsledku je intenzita magnetického poľa priamo úmerná prúdu pretekajúcemu primárnym vinutím.

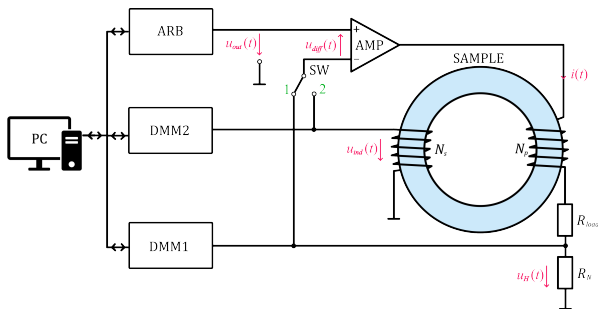
$$H(t) = \frac{N_p}{2\pi r} i(t) \quad (3.8)$$

Pre určenie diferenciálnej permeability je teda potrebné zabezpečiť definovaný (trojuholníkový) časový priebeh prúdu a mať k dispozícii vhodný dvojkanálový systém zberu údajov, pomocou ktorého je synchronne meraný časový priebeh prúdu tečúceho primárnym vinutím a napätie indukované v sekundárnom vinutí.

3.2 Meracia aparátúra

Ako vyplýva z teoretickej analýzy, experimentálna aparátúra by mala byť založená na platnosti dvoch jednoduchých rovníc (3.5) pre diferenciálnu permeabilitu a (3.8) pre intenzitu aplikovaného poľa, kvôli potrebe definovaného tvaru vlny intenzity poľa (konštantná rýchlosť zmeny poľa). Na dosiahnutie požadovaného trojuholníkového tvaru vlny je okrem merania potrebná aj primeraná regulácia prúdu. Ak sa nepoužije žiadna regulácia prúdu, potom diferenciálnu permeabilitu nemožno zistiť priamo z indukovaného napätia pomocou (3.5). Napriek tomu je jej výpočet stále možný, ale je potrebné použiť všeobecnejšie vzťahy (3.1), (3.2). To je spojené s mnohými problémami, pretože numerická derivácia je veľmi citlivá na šum signálu, atď. Na získanie dostatočných údajov pre počiatočnú permeabilitu je potrebný iba dvojkanálový systém zberu údajov (DAQ). Jeden kanál je potrebný na meranie prúdu súvisiaceho s intenzitou budiaceho poľa, druhý kanál je na získanie priebehu indukovaného napätia. Ďalej je stručne opísaný pokročilý systém DAQ, ktorý je schopný plne ovládať tvary kriviek, ako aj pokročilé spracovanie signálu a analýzu údajov. Na obrázku č. 3.1 je znázornená zjednodušená bloková schéma experimentálnej aparátúry, kde na magneticky uzavretej vozrke (toroidné jadro) sú priamo navinuté primárne aj sekundárne vinutia. Generátor ľubovoľných časových priebehov (Arbitrary Waveform Generator – ARB) slúži ako zdroj napäťového signálu. Jeho výstup je napojený na precízny výkonný operačný zesilovač (AMP), ktorý pracuje ako prevodník napätia na prúd (napätím ovládaný zdroj prúdu) a dodáva dostatok energie na magnetizovanie testovanej vzorky až po magnetickú saturáciu. Rezistor R_{load} sa používa na zväčšenie reálnej zložky zaťažovacej impedancie. Napätie na rezistorovom štandarde

R_N (najlepšie precízny kalibračný rezistor, minimalizované parazitné indukčnosti a kapacity, štvorvodičové Kelvinovo zapojenie), priamo úmerné prúdu (podľa Ohmového zákona $u_H(t) = R_N \cdot i(t)$), je vzorkované rýchlym digitálnym multimetrom (DMM1). Takto sa meria signál úmerný tvaru časového priebehu budiaceho poľa. Napätie $u_{ind}(t)$, indukované v sekundárnom vinutí s počtom závitov N_s , je vzorkované identickým digitálnym multimetrom (DMM2), aby sa zabezpečilo súbežné vzorkovanie okamžitých hodnôt oboch napätí. Ovládanie prístrojov a spracovanie nameraných údajov sa vykonáva pomocou osobného počítača (PC) vybaveného softvérom na mieru pre automatizované meranie a softvérom na spracovanie údajov. Celá komunikácia medzi PC a ostatnými prístrojmi využíva buď káblové (LAN, GPIB, USB, RS232, atď.) alebo bezdrôtové (Wi-Fi, Bluetooth) rozhrania.



Obr. 3.1. Zjednodušená bloková schéma experimentálnej aparatury pre MAT.

3.3 Postup pri meraní

Princíp merania bol navrhnutý tak, aby umožňoval efektívne vyhodnocovanie diferenciálnej permeability skúmaných vzoriek bez potreby časovo náročného demagnetizovania. Presné hodnoty jednotlivých parametrov meraní sú uvedené individuálne pri každej vzorke. Pri meraniach bol použitý definovaný trojuholníkový priebeh budiaceho poľa s postupne znižujúcou

sa amplitúdou, čo umožnilo odmerať sériu minoritných hysteréznych slučiek. Pre lepšie pochopenie sú priebehy budiaceho signálu, minoritných hysteréznych slučiek, indukovaného napätia a diferenciálnej permeability zobrazené na obrázku 6.4.

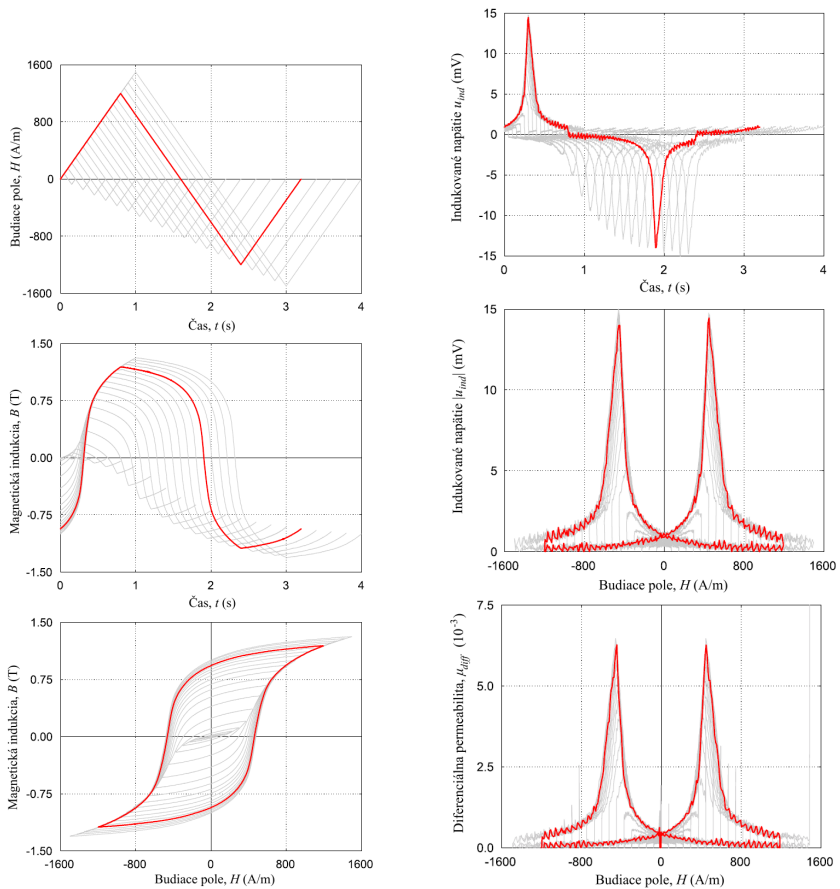
Pred každým meraním bolo aplikovaných niekoľko predmagnetizačných cyklov s rovnakými parametrami ako pri samotnom meraní. Týmto prístupom sa eliminovala akákoľvek predchádzajúca magnetizačná história vzorky a vytvorili sa dobre definované počiatočné podmienky. Vďaka tomu nebolo potrebné vykonávať demagnetizovanie vzoriek, čo významne zefektívnilo proces merania. Amplitúda i -tej hysteréznej slučky je vyjadrená ako

$$H_i = H_{max,i} = H_{start} - (i - 1) \cdot \Delta H, \quad (3.9)$$

kde $i = 1, 2, \dots, r$ je index premennej, H_{start} je najvyššia (štartovacia) amplitúda. Zvyčajne je zvolená ako celočíselný násobok kroku ΔH ($H_{start} = r \cdot \Delta H$) a najnižšia amplitúda $H_{stop} = \Delta H$. Z toho je zrejmé, že r je celkový počet meraných cyklov. Keďže zmena poľa je podľa vzťahu č. 3.4 konštantná, znižujúca sa amplitúda zapríčiňuje znižovanie periódy T_i , teda zvyšovanie frekvencie f_i signálu. Namerané hysterézne slučky boli vďaka predmagnetovaniu dokonale symetrické, čo umožnilo presné vyhodnotenie diferenciálnej permeability podľa vzťahu č. 3.5 z časti priebehu indukovaného napätia zodpovedajúcemu klesajúcej časti slučky. To zodpovedá napríklad budiacemu poľu, meniacemu sa monotónne od $+H$ po $-H$, čo je odpovedajúce času t z intervalu $\langle T_i/4, 3T_i/4 \rangle$. V tomto intervale je vzťah aplikovaného poľa $H(t)$ a času t lineárny a monotónny a indukované napätie je možné vyjadriť ako funkciu aplikovaného poľa $u_{ind}(H)$.

3.4 Spôsob vyhodnocovania nameraných údajov

Diferenciálna permeabilita bola zvolená ako hlavný hodnotiaci parameter, keďže vykazuje vysokú citlivosť na rôzne formy mechanického a tepelného zaťaženia feromagnetických materiálov. Z nameraných priebehov indukovan-



(a) Príklady experimentálne získaných priebehov budiaceho poľa $H(t)$ (hore), korešpondujúca magnetická indukcia $B(t)$ (v strede), a minoritné hysterézne slučky $B(H)$ (dole)

(b) Indukované napätie $v_{ind}(t)$ v čase (hore), jeho absolútna hodnota ako funkcia budiaceho poľa (v strede), a relatívna diferenciálna permeabilita μ_{diff} získaná pomocou vzťahu 3.1.

Obr. 3.2. Priebehy budiaceho signálu, minoritných hysteréznych slučiek, indukovaného napätia a diferenciálnej permeability.

vaného napätia boli pomocou interpolácie získané diskkrétne hodnoty diferenciálnej permeability pri definovaných hodnotách intenzity magnetického poľa. Tieto údaje boli usporiadané do maticovej formy, ktorá umožnila systematickú analýzu zmien magnetických vlastností v závislosti od

amplitúdy magnetizačných slučiek.

Merania boli opakované po jednotlivých krokoch aplikovaného zaťaženia pri rovnakých experimentálnych podmienkach. Výsledné matice boli následne zoradené do viacrozmerného poľa, v ktorom jednotlivé vrstvy reprezentovali postupné stavy zaťaženia materiálu. Keďže diferenciálna permeabilita sa mení v niekoľkých rádoch, je výhodnejšie porovnať merané hodnoty so súborom počiatočných hodnôt, prislúchajúcim vzorke pred tepelným, mechanickým, alebo iným namáhaním. Z toho dôvodu boli údaje normalizované vzhľadom na počiatočný, nezaťažený stav vzorky.

Cieľom vyhodnocovania bolo identifikovať oblasti v diskretizovanom priestore magnetických parametrov, v ktorých je diferenciálna permeabilita najcitlivejšia na zmeny spôsobené zaťažením. Na tento účel boli pre jednotlivé kombinácie parametrov zostavené kalibračné krivky, ktorých citlivosť bola hodnotená pomocou lineárnej regresie. Ako kritériá výberu boli použité sklon regresnej priamky a koeficient determinácie, pričom celý proces identifikácie citlivých oblastí bol realizovaný pomocou vyvíjaného softvérového nástroja.

4 Vyvíjaný softvér na analýzu nameraných magnetických parametrov

Pre efektívne vyhodnocovanie veľkého množstva nameraných údajov pomocou MAT metódy, je potrebný softvér na analýzu údajov. V dizertačnej práci sa venujem aj tejto problematike a nadviazala som tak na existujúce časti softvéru, už skôr vytvorené ako súčasť riešenia výskumných úloh na Oddelení teoretickej elektrotechniky v rámci ústavu elektrotechniky FEI STU. Cieľom mojich úprav bol ďalší rozvoj analytických metód, ktoré sú opísané v tejto kapitole.

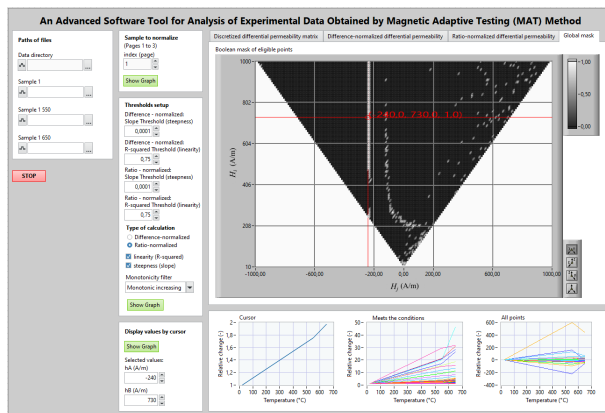
4.1 Prvá fáza vývoja softvéru pomocou prostredia LabVIEW

V prvej fáze vývoja softvéru bolo použité vývojové prostredie LabVIEW, nadväzujúce na existujúci program, ktorý bol ďalej rozšírený. Toto prostredie bolo vybrané kvôli možnosti prepojenie merania, spracovania a vizualizácie údajov v jednom celku a priebežné testovanie vyhodnocovacích algoritmov.

Softvér bol overený na meraniach magneticky uzavretej prstencovej vzorky v počiatočnom stave a po tepelnom spracovaní pri 550 °C a 650 °C. Spracovávané údaje zahŕňali časové priebehy intenzity magnetického poľa, indukovaného napätia, magnetickej indukcie a diferenciálnej permeability.

Na základe interpolovaných hodnôt diferenciálnej permeability boli vytvorené matice normalizovaných údajov, ktoré slúžili ako vstup pre ďalšie vyhodnocovanie. Pre jednotlivé body bola vykonaná lineárna aproximácia, pričom boli hodnotené parametre citlivosti a kvality regresného modelu. Výsledkom sú matice charakterizujúce zmeny diferenciálnej permeability a logické masky identifikujúce oblasti s najvyššou citlivosťou na aplikované zaťaženie.

Pre prezentáciu výsledkov bolo navrhnuté užívateľské rozhranie, ktoré umožňuje interaktívne nastavovanie vyhodnocovacích kritérií a zobrazovanie normalizovaných údajov, ako aj identifikovaných citlivých oblastí. Grafické rozhranie softvéru je znázornené na Obrázku č.4.1.



Obr. 4.1. Užívateľské rozhranie.

4.2 Druhá fáza vývoja softvéru pomocou prostredia Matlab

Pre ďalší vývoj vyhodnocovacieho softvéru bolo zvolené prostredie Matlab, najmä pre jeho pokročilé možnosti práce s maticami, prehľadnosť algoritmov a vyššiu univerzálnosť riešenia. Oproti pôvodnej implementácii v

LabVIEW umožňuje jednoduchšie rozširovanie funkčnosti, údržbu kódu a využitie objektovo orientovaného prístupu, pričom zostala zachovaná možnosť prepojenia oboch prostredí.

Softvér je navrhnutý ako modulárny systém, ktorý umožňuje načítanie ľubovoľného počtu meraní pri rôznych stupňoch zaťaženia. Po načítaní dát sú vybrané relevantné priebehy intenzity magnetického poľa a diferenciálnej permeability, ktoré sú interpolované do spoločných bodov a následne normalizované rozdielovým alebo pomerovým spôsobom.

Na potlačenie náhodných extrémnych hodnôt je aplikované filtrovanie normalizovaných údajov, pričom použitý filtračný algoritmus je možné v budúcnosti jednoducho modifikovať alebo nahradiť. Z filtrovaných hodnôt je pre jednotlivé body vypočítaná lineárna regresia, pričom sa hodnotí strmosť závislosti a kvalita aproximácie pomocou koeficientu determinácie.

Na základe užívateľsky definovaných hraničných hodnôt sú vytvorené logické masky, ktoré identifikujú oblasti s najvyššou citlivosťou diferenciálnej permeability na aplikované zaťaženie. Softvér umožňuje vizualizáciu výsledných masiek aj jednotlivých medzivýsledkov a slúži ako funkčný základ pre ďalší rozvoj komplexného vyhodnocovacieho nástroja.

4.3 Rozšírenie možností vyhodnotenia nameraných údajov v prostredí Matlab

Ako bolo v tézach práce stanovené, v ďalšom vývoji softvéru bola rozšírená možnosť vyhodnocovania nameraných údajov. Vyhodnocovací algoritmus bol rozšírený o možnosť použitia rôznych vyhladzovacích funkcií, s cieľom odstránenia náhodných hodnôt mimo oblasti záujmu. Rovnako bolo pridané vyhodnotenie vzťahu medzi vybranými hodnotami pomocou viacerých korelačných koeficientov. Tieto pridané možnosti vyhodnotenia by mali priniesť väčšiu univerzálnosť a presnosť vyhodnocovania nameraných údajov.

4.3.1 Vyhľadanie údajov v maticiach

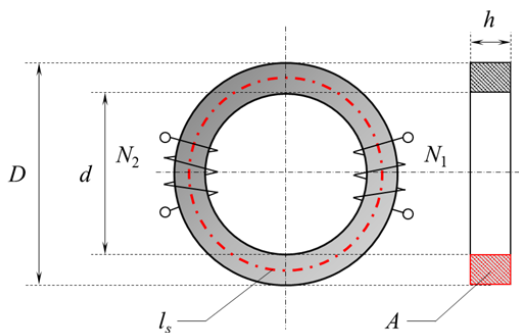
Na vyhľadzovanie nameraných údajov bolo použitých viacero metód založených na princípe posuvného okna, v ktorom je hodnota každého bodu nahradená vypočítanou hodnotou z jeho okolia. Uplatnené boli metódy Gaussovho váženého priemeru, pohyblivého priemeru, pohyblivého mediánu, robustnej lineárnej regresie a Savitzkyho–Golayov filter, ktoré sú dostupné prostredníctvom funkcie „smoothdata“ v prostredí Matlab. Tieto metódy umožňujú účinné potlačenie šumu pri zachovaní trendov v údajoch, najmä pri rýchlo sa meniacich hodnotách. Vzhľadom na prítomnosť nečíselných hodnôt v trojuholníkových maticiach bola zvolená možnosť vynechania hodnôt NaN , čím sa zachoval tvar a rozmery výsledných dát.

4.3.2 Korelačné koeficienty

Pri analýze vzťahu medzi nameranými hodnotami a aplikovanou záťažou bolo pôvodné hodnotenie lineárnosti rozšírené o výpočet korelačných koeficientov. V softvéri sú použité tri typy korelácie: Pearsonov, Spearmanov a Kendallov koeficient, ktoré umožňujú hodnotiť lineárne aj monotónne závislosti a sú menej citlivé na extrémny. Korelácia sa počíta medzi vektorom záťaže (napr. teplota alebo čas) a vektormi hodnôt diferenciálnej permeability pre jednotlivé body diskretizovanej matice. Na výpočet bola použitá funkcia „corr“ v prostredí Matlab. Výsledkom sú matice korelačných koeficientov so zhodným rozmerom ako pôvodné trojuholníkové matice, ktoré umožňujú identifikovať oblasti s najvýraznejšou závislosťou magnetických vlastností od aplikovaného zaťaženia.

5 Vyhodnotenie experimentálnych meraní na magneticky uzatvorených vzorkách

Na experimentálne testovanie sa štandardne využívajú magneticky uzatvorené vzorky v tvare prstenca s obdĺžnikovým prierezom (plocha A). Prvý použitý materiál bol pozinkovaný oceľový plech, žíhaný pri teplotách $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzorky boli vyrezané vodným lúčom s rozmermi vnútorného priemeru $d = 25,8\text{ mm}$, vonkajšieho priemeru $D = 28,07\text{ mm}$ a výškou $h = 1,55\text{ mm}$. Ďalšie skúmané vzorky boli žíhané pri konštantnej teplote 753 K po rôzne dlhú dobu, a to 2, 4, 6, 20, 40 a 60 hodín. Tieto prstencové vzorky boli vyhotovené z komerčnej nízkouhlíkovej ocele ($C < 0,06\text{ }\%$, $\text{Mn} < 0,45\text{ }\%$, $\text{Si} < 0,15\text{ }\%$, $\text{Al} < 0,02\text{ }\%$, $\text{P} < 0,02\text{ }\%$, $\text{S} < 0,02\text{ }\%$) s vnútorným priemerom $d = 46\text{ mm}$, vonkajším priemerom $D = 56\text{ mm}$ a výškou $h = 5\text{ mm}$. Presnosť uvedených rozmerov vzoriek je daná presnosťou mikrometra, resp. posuvného meradla.



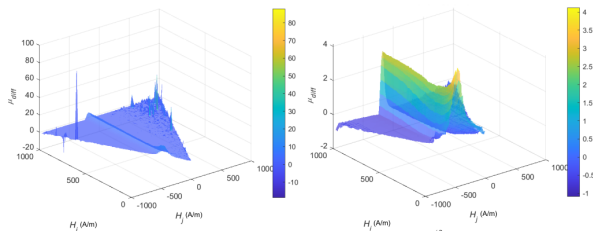
Obr. 5.1. Tvar a rozmer vzorky, l_s je priemerná dĺžka magnetického toku, A je prierez vzorky.

S pomocou softvérových nástrojov vytvorených ako súčasť tejto práce sa podarilo na skôr získaných experimentálnych dátach overiť princípy MAT metódy. V prípade prvého softvéru, išlo len o analýzu dát z meraní prvej prstencovej vzorky, ktorá bola namáhaná žihaním pri 550 °C a 650 °C. Pomocou druhej verzie softvéru (Matlab) sa podarila aj analýza dát z meraní ďalšej vzorky, ktorá bola žihaná pri konštantnej teplote po rôzne dlhú dobu.

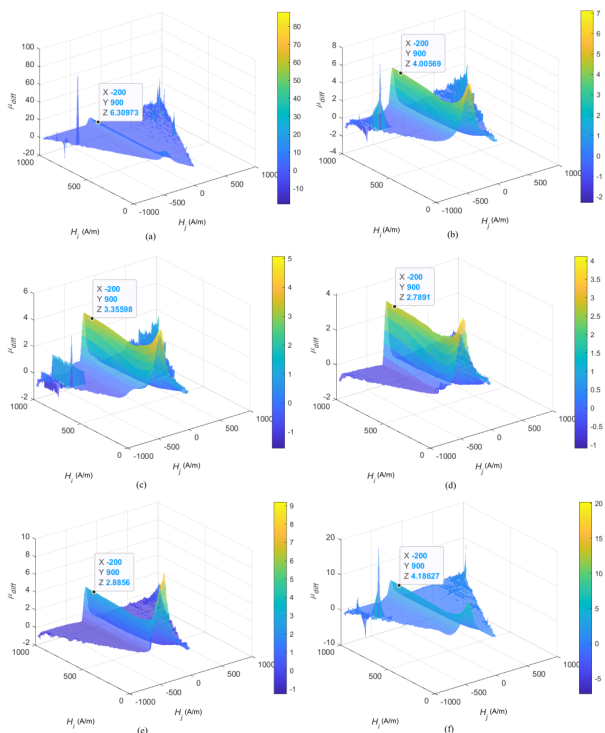
5.1 Vzorka žihaná pri rôznych teplotách

Rozšírený softvér umožňuje zobrazíť vyhladené hodnoty diferenciálnej permeability a logickú masku podľa vybraného korelačného koeficientu (opísané v 4.3.2, publikované v [3]). Porovnanie účinku rôznych metód vyhladenia je uvedené na obr. 5.3. Pracujeme pritom len s diferenciálne normalizovanými hodnotami (podkapitola 3.4).

Na obr. 5.3 sú zobrazené matice po žihaní pri 650 °C normalizované voči hodnotám pred záťažou. Každá matica zobrazuje rovnaký bod, kde je viditeľná zmena hodnoty na osi z . Najmenšiu zmenu vykázal Savitzkyho-Golayov filter, pričom najefektívnejšie odstránenie šumu dosiahol pohyblivý medián (obr. 5.3d). Obr. 5.2 porovnáva matice pred a po záťaži, pričom pre ilustráciu je zobrazená pôvodná, nevyhladená matica v porovnaní s vyhladenou.

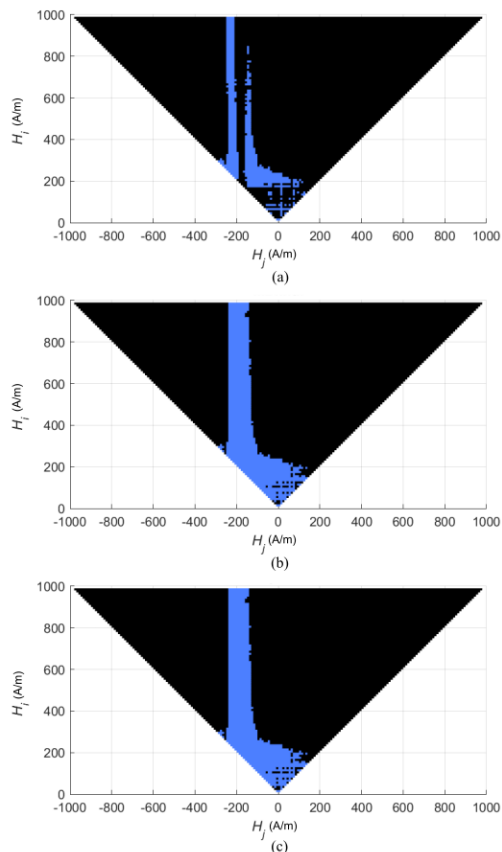


Obr. 5.2. Porovnanie hodnôt pred a po aplikovaní vyhladenia pomocou pohyblivého priemeru na normalizované hodnoty po žihaní pri 650 °C (vľavo) a po žihaní pri 650 °C s použitím vyhladenia (vpravo).



Obr. 5.3. Porovnanie vyhladzovacích funkcií normalizovaných hodnôt diferenciálnej permeability (normalizované hodnoty po žíhaní pri 650 °C): (a) - hodnoty bez vyhladenia, (b) - Gaussov vážený priemer, (c) - pohyblivý priemer, (d) - pohyblivý medián, (e) - robustná lineárna regresia, (f) - Savitzkyho-Golayov filter.

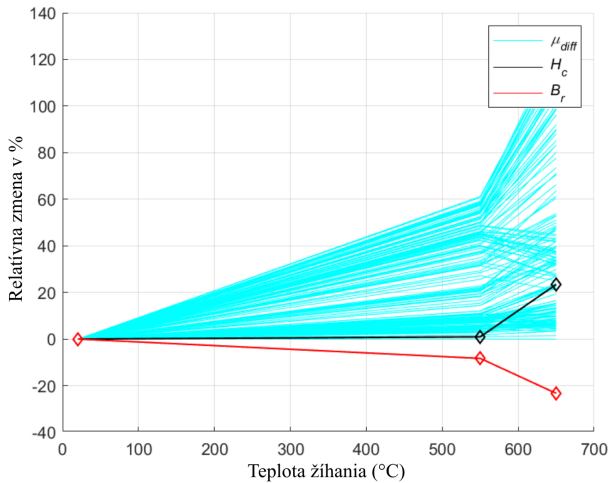
Vyhladené hodnoty pomocou pohyblivého mediánu boli použité pre ďalšie vyhodnotenie korelačných koeficientov. Hraničná hodnota 0,7 umožnila vizualizovať silno závislé krivky, [4]. Výsledné logické masky sú zobrazené na obr. 5.4, kde modrou farbou sú označené body spĺňajúce podmienku (logická 1). Kendallov a Spearmanov koeficient sa odporúča použiť pri väčšom počte meraní (aspoň 8 - 10), keďže v tomto prípade nadobúda len obmedzený počet hodnôt, [5].



Obr. 5.4. Porovnanie korelačných koeficientov na vyhladených hodnotách pomocou pohyblivého priemeru, (a) - Pearsonov korelačný koeficient, (b) - Kendallov korelačný koeficient, (c) - Spearmanov korelačný koeficient.

Hlavným prínosom MAT metódy je vyššia citlivosť diferenciálnej permeability na štrukturálne zmeny oproti klasickým parametrom, ako sú koercitívne pole a remanentná indukcia. Na obr. 5.5 sú relatívne zmeny μ_{diff} , H_c a B_r pri rôznych záťažoch. Vybrané hodnoty μ_{diff} zodpovedajú Pearsonovmu koeficientu $> 0,9$, pričom čiernou sú zobrazené krivky H_c a B_r , modrou μ_{diff} . Podmienku zvolenej hranice 0,7 spĺňalo príliš veľa kriviek, preto bola hranica sprísnená. Relatívna zmena diferenciálnej permeabi-

lity presahuje 100%, zatiaľ čo H_c a B_r sa menia len o niekoľko desiatok percent. Môžeme však vidieť, že pre posúdenie existencie závislostí medzi zmenami hodnôt diferenciálnej permeability pred a po pôsobení záťaže, je možné použiť viaceré prístupy, pričom každý z nich v nejakej miere závislosť preukázal.

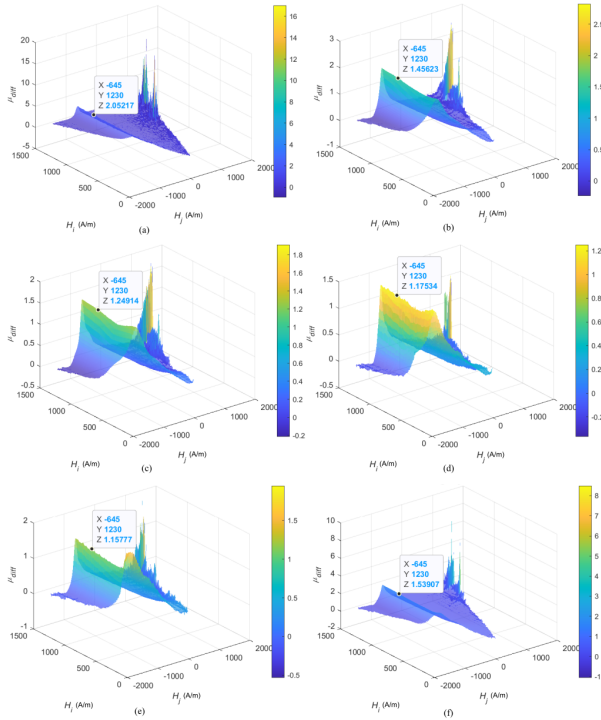


Obr. 5.5. Relatívne zmeny diferenciálnej permeability μ_{diff} , koercitívnej intenzity podľa H_c a remanentnej indukcie B_r pri rôznych hodnotách zaťaženia.

5.2 Vzorka žíhaná rôzne dlhý čas

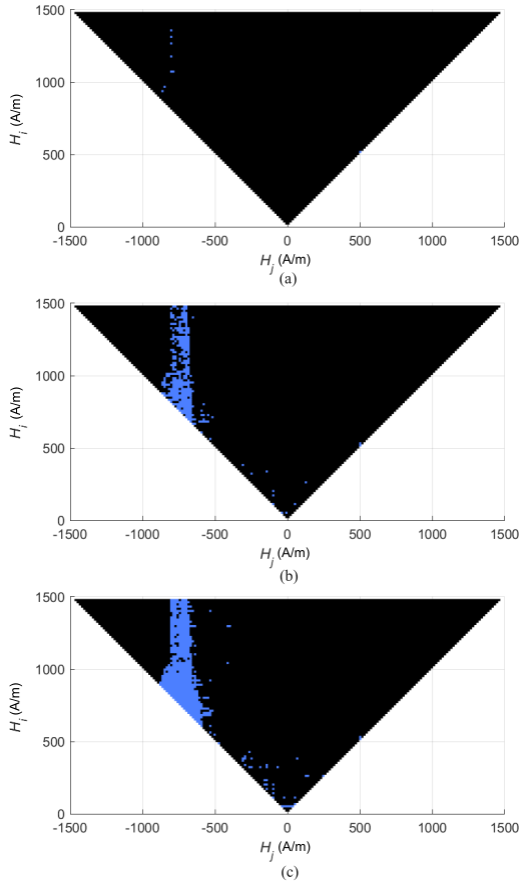
Vďaka univerzálnosti novej verzie softvéru je možné analyzovať dáta z ľubovoľného počtu meraní pre vzorku. V tomto prípade šlo o vzorku žíhanú pri rovnakej teplote (753 K), po rôzne dlhú dobu a to 2, 4, 6, 20, 40 a 60 hodín. Aj v prípade tejto vzorky, aplikujeme nové možnosti vyhodnotenia údajov. Rozšírené možnosti vyhladenia údajov a vyhodnotenie závislostí pomocou korelačných koeficientov ukazujú znovu o niečo zreteľnejšie výsledky. V prvom obrázku je zobrazené vyhladenie údajov pomocou skôr spomínaných filtrov. Tie sú aplikované na vybranú normalizovanú maticu

po aplikovaní určitej záťaže, v tomto prípade je to žihanie po dobu 20 hodín.



Obr. 5.6. Porovnanie vyhladzovacích funkcií normalizovaných hodnôt diferenciálnej permeability (normalizované hodnoty po žihaní po dobu 20h): (a) - hodnoty bez vyhladenia, (b) - Gaussov vážený priemer, (c) - pohyblivý priemer, (d) - pohyblivý medián, (e) - robustná lineárna regresia, (f) - Savitzkyho-Golayov filter.

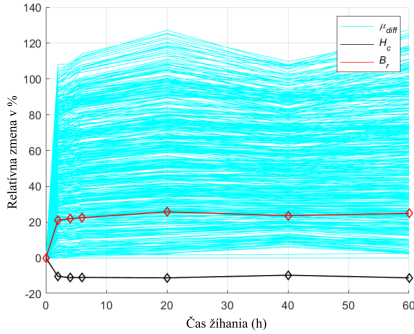
Aj v tomto prípade sa ukázalo vyhladenie pomocou pohyblivého mediánu ako najvhodnejšie, kvôli najväčšiemu vyhladeniu šumových extrémnych hodnôt. Preto rovnako ako pri prvej vzorke, pre porovnanie korelačných koeficientov budú slúžiť matice vyhladené pomocou pohyblivého mediánu. Toto porovnanie je zobrazené na nasledujúcom obrázku 5.7, kde sú podobne ako v prvom prípade zobrazené hodnoty koeficientov vyššie ako 0,7 modrou farbou.



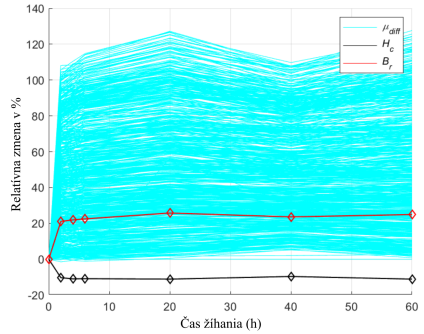
Obr. 5.7. Porovnanie korelačných koeficientov na vyhladených hodnotách pomocou pohyblivého priemeru, (a) - Pearsonov korelačný koeficient, (b) - Kendallov korelačný koeficient, (c) - Spearmanov korelačný koeficient.

Na rozdiel od predchádzajúcej vzorky, v tomto prípade sa ukázal ako najcitlivejší na závislosť medzi veličinami Spearmanov korelačný koeficient. Naopak Pearsonov korelačný koeficient nepreukázal silnú závislosť kriviek. Rovnako aj v tomto prípade je možné preukázať vyššiu citlivosť diferenciálnej permeability na zmeny po pôsobení záťaže, ako vykazujú štandardné parametre. Vzhľadom na to, že v tomto prípade pracujeme s hodnotami

parametra v siedmych bodoch záťaže, bolo možné použiť ako kritérium výberu kriviek Spearmanov a Kendallov korelačný koeficient. Na preukázanie citlivosti zvoleného parametra sú v nasledujúcich grafoch zobrazené krivky spĺňajúce kritérium hodnoty korelačného koeficientu vyššieho ako 0,7 v oboch prípadoch. Podobne ako v prípade vzorky žihanej pri rôznych teplotách, aj tu sú v grafoch zobrazené pre porovnanie krivky relatívnej zmeny koercitívnej intenzity H_c a remanentnej indukcie B_r .



(a) Kritérium výberu: Kendallov korelačný koeficient > 0.7



(b) Kritérium výberu: Spearmanov korelačný koeficient > 0.7

Obr. 5.8. Relatívne zmeny diferenciálnej permeability μ_{diff} , koercitívnej intenzity poľa H_c a remanentnej indukcie B_r pri rôznych hodnotách zaťaženia.

V oboch prípadoch sa dá pozorovať relatívna zmena diferenciálnej permeability výrazne vyššia v porovnaní s vybranými krivkami H_c a B_r , čo znova preukázalo vysokú citlivosť MAT metódy, ako to bolo publikované napríklad v [6].

6 Vyhodnotenie experimentálnych meraní na magneticky otvorených vzorkách

V ďalšej fáze riešenia dizertačnej práce bolo úspešne realizované meranie na magneticky otvorenej vzorke, čo predstavuje významný prínos pre praktickú aplikáciu metódy MAT. Meranie prebiehalo v dvoch etapách – predmagnetovanie vzorky za účelom dosiahnutia definovaného magnetického stavu a následná kalibrácia magnetického toku, pri ktorej bola intenzita magnetického poľa meraná Hallovoú sondou.

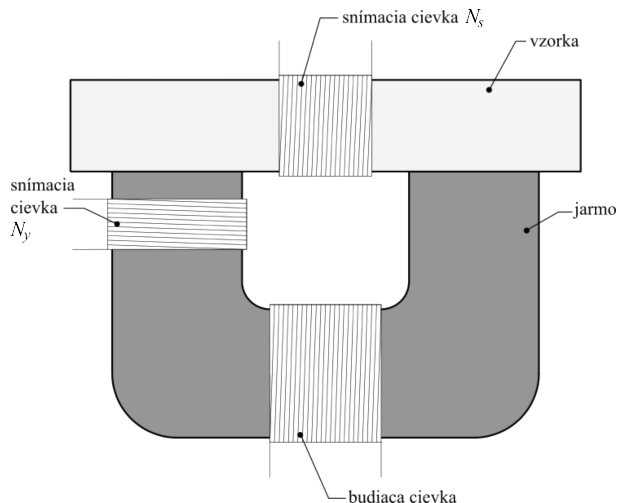
Hoci sú merania na magneticky otvorených vzorkách bežné, pri metóde MAT sú problematické z hľadiska presnosti stanovenia magnetických veličín, najmä pri použití C-jadra. Z tohto dôvodu bol skúmaný vzťah medzi magnetujúcim prúdom a intenzitou magnetického poľa vo vzorke, ako aj korelácia medzi magnetickou indukciou v budiacom jarme a priamo vo vzorke. Keďže metóda MAT vyhodnocuje relatívne zmeny, absolútna metrologická presnosť nie je nevyhnutná a systematické chyby sa môžu čiastočne kompenzovať.

Používané vzorky mali rozmery $0 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$, zhodné so štandardnými Charpyho vzorkami bez „v“ zárezu, [7]. Po priložení vzorky na jarmo je magnetický obvod uzavretý a je tak možné merať magnetické veličiny. Spôsob merania je zobrazený na obr. č. 6.1.

Meracia zostava bola podobná ako pri magneticky uzatvorenej vzorke a pozostávala zo zariadenia na zber dát KEYSIGHT DAQ970A Data Acquisition System, generátora časových priebehov KEYSIGHT 33500B Series Waveform Generator, výkonového operačného zosilňovača, rezistorov R_N a R_{load} a osobného počítača, ktorého súčasťou je na mieru vyrobený me-

rací softvér. Vzorka bola umiestnená na C-jadre v plastovom prípravku na mieru navrhnutom a vyrobenom pomocou 3D tlač, pričom na jarme a vzorke boli navinuté budiaca a snímacie cievky s individuálne navrhnutými kostričkami.

Súčasťou aparatury bol aj softvér automatizovaného merania v prostredí LabVIEW, ktorý umožňoval nastavenie parametrov merania, zber, ukladanie a vizualizáciu nameraných údajov.



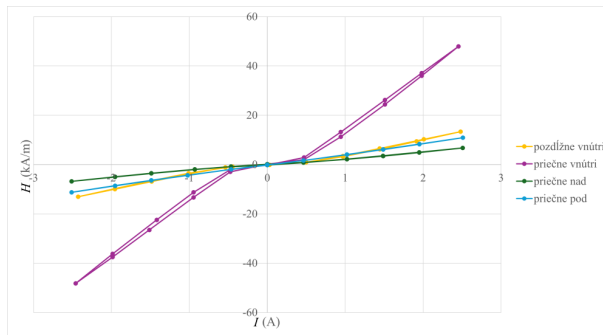
Obr. 6.1. Schematické zobrazenie spôsobu merania na otvorenej vzorke.

6.1 Vyšetrovanie vzťahu medzi magnetizujúcim prúdom a intenzitou magnetického poľa vo vzorke

Cieľom tejto časti experimentu bolo overiť, či je možné nahradiť magneticky uzavreté obvody otvorenou konfiguráciou pri zachovaní spoľahlivosti meraní. V prvom kroku bola meraná závislosť intenzity magnetického poľa od budiaceho prúdu v rozsahu 0–2,5 A s krokom 0,5 A. Merania prebie-

hali v štyroch konfiguráciách podľa polohy Hallovej sondy voči vzorke (vo vzorke pozdĺžne, vo vzorke priečne, nad a pod vzorkou), pričom sonda bola umiestnená v pozdĺžnom alebo priečnom otvore vo vzorke. Na meranie bol použitý Gaussmeter F.W. Bell 5070.

Pre každú konfiguráciu boli porovnané závislosti pre tri hodnoty vzduchovej medzery medzi vzorkou a jarmom (0,0 mm, 0,1 mm a 0,2 mm), vytvorenej plastovou fóliou definovanej hrúbky. Výsledky ukázali, že poloha Hallovej sondy má výrazný vplyv na nameranú intenzitu magnetického poľa, pričom najvyššie hodnoty boli zaznamenané pri priečnom umiestnení sondy (obr. 6.2).



Obr. 6.2. Závislosť intenzity magnetického poľa vo vzorke od budiaceho prúdu - porovnanie podľa umiestnenia Hallovej sondy pri vzduchovej medzere 0 mm.

Experimenty zároveň poukázali na nelineárnu závislosť medzi budiacim prúdom a intenzitou magnetického poľa, pričom sa v niektorých prípadoch objavila aj hysteréza kalibračných kriviek. Táto nelinearita predstavuje zásadné obmedzenie pri absolútnej kalibrácii magneticky otvorených systémov. Metóda MAT tento problém eliminuje vyhodnocovaním relatívnych zmien parametrov, pri ktorých sa vplyv kalibračných nepresností výrazne potláča.

6.2 Vyšetrovanie vzťahu medzi magnetickým tokom vo vzorke a v jarme

Podobne ako v prípade magneticky uzatvorenej vzorky, sa vykonáva meranie indukovaného napätia na snímačej cievke. V nadväznosti na teoretický princíp MAT metódy, pre opis magnetického toku pomocou indukovaného napätia je možné použitie vzťahu č. 3.3 aplikovaného pre jarmo (dolný index y - „yoke“) a vzorku (dolný index s - „sample“):

$$u_{\text{ind}, y}(t) = N_{sy} A_y \frac{dB_y(t)}{dt} \quad (6.1)$$

$$u_{\text{ind}, s}(t) = N_{ss} A_s \frac{dB_s(t)}{dt}, \quad (6.2)$$

N_{sy} a N_{ss} sú počty závitov na sekundárnom vinutí, kde prvý index s je od „secondary“ a druhý sa týka lokality, na ktorej je navinutá sekundárna cievka - „sample“ a „yoke“. Vzťah je možné upraviť ako

$$\frac{dB_y(t)}{dt} = \frac{u_{\text{ind}, y}(t)}{N_{sy} A_y} \quad (6.3)$$

$$\frac{dB_s(t)}{dt} = \frac{u_{\text{ind}, s}(t)}{N_{ss} A_s}. \quad (6.4)$$

Po zintegrovaní a úprave týchto vzťahov, je možné magnetický tok vyjadriť ako funkciu indukovaného napätia takto:

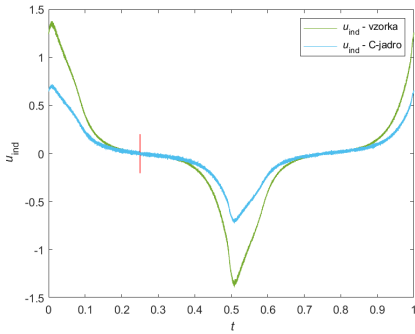
$$\Phi_y(t) = B_y(t) A_y = \frac{\int u_{\text{ind}, y}(t) dt}{N_{sy}} \quad (6.5)$$

$$\Phi_s(t) = B_s(t) A_s = \frac{\int u_{\text{ind}, s}(t) dt}{N_{ss}}. \quad (6.6)$$

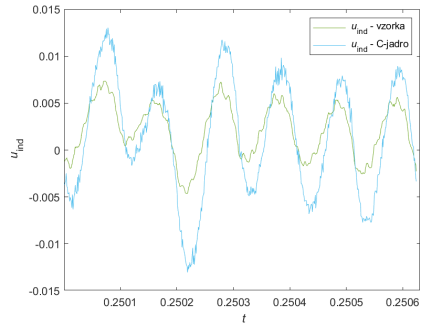
Z uvedeného vyplýva, že meraním indukovaného napätia na snímačej cievke na vzorke a na jarme dokážeme získať informácie o magnetickom toku. Vzorky boli merané pílovitým prúdom s klesajúcou amplitúdou od 2,5 A do 0,125 A pri frekvencii 1 Hz, pričom pred každým meraním prebehla predmagnetizácia desiatimi cyklami. Vzťah medzi magnetickým tokom vo

vzorke a v jarme bol hodnotený pomocou Pearsonovho korelačného koeficientu, a to globálne pre celé periódy aj lokálne na vybraných úsekoch signálu.

Výsledky ukázali veľmi vysokú globálnu koreláciu medzi priebehmi indukovaného napätia, napríklad pri amplitúde 1,25 A dosahoval korelačný koeficient hodnotu $r_P = 0,9995$. Aj lokálna analýza na krátkych úsekoch signálu potvrdila výraznú podobnosť priebehov, čo naznačuje spoločný pôvod lokálnych extrémov súvisiacich s magnetickým tokom. Tým sa potvrdilo, že magnetický tok v jarme a vo vzorke je silne previazaný aj v prítomnosti rozptylových tokov.



(a) Úsek priebehu pre výpočet lokálneho korel. koef. (pri ampl. 2,375 A, začiatok v čase $T/4$).



(b) Hodnoty indukovaného napätia vo vzorke a v C-jadre (približená časť priebehu, $r_P = 0,9273$).

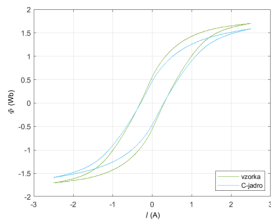
Obr. 6.3. Priebehy budiaceho signálu, minoritných hysteréznych slučiek, indukovaného napätia a diferenciálnej permeability.

Porovnanie meraní pri rôznych veľkostiach vzduchovej medzery ukázalo mierny pokles korelačného koeficientu so zvyšujúcou sa medzerou, avšak aj pri 0,2 mm ostávali hodnoty blízke 1, čo potvrdzuje robustnosť metódy. Minimálna hodnota globálneho korelačného koeficientu dosiahla 0,955 pri najnižšej amplitúde prúdu.

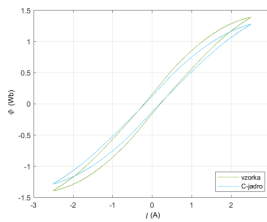
Na základe vysokej korelácie medzi magnetickým tokom v jarme a vo vzorke je z praktického hľadiska výhodné nahradiť klasické hysterézne $B(H)$ slučky ekvivalentnými $\Phi(I)$ slučkami, ktoré nevyžadujú náročnú ka-

libráciu intenzity magnetického poľa. Merania potvrdili, že priebehy magnetického toku v jarme a vo vzorke sú takmer totožné, pričom malé rozdiely sú spôsobené rozptylovými tokmi a vzduchovou medzerou.

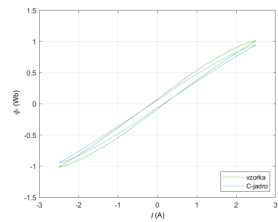
Získané výsledky vedú k záveru, že pri metóde MAT postačuje meranie magnetických veličín na jarme, na základe ktorého je možné spoľahlivo odhadnúť magnetický tok vo vzorke. Nie je preto nutné vytvárať magneticky uzavretý obvod – vhodne tvarované C-jadro predstavuje dostatočné riešenie. Tieto zistenia potvrdzujú použiteľnosť a spoľahlivosť MAT metódy aj pre magneticky otvorené vzorky.



(a) medzera 0 mm



(b) medzera 0,1 mm



(c) medzera 0,2 mm

Obr. 6.4. Priebehy magnetického toku v závislosti od prúdu vo vzorke a v C-jadre, (H_{max}).

Záver

V tejto práci boli zhrnuté základné poznatky týkajúce sa nedeštruktívnej defektoskopie, metód využívajúcich elektromagnetické parametre, ako aj základných vlastností magnetických látok. Metódou, na ktorú sa táto práca zameriava, je metóda nazývaná Magnetické Adaptívne Testovanie (MAT), založená na prispôbení výberu sledovaných magnetických parametrov na tú podmnožinu, u ktorej sa podľa zvolených kritérií ich zmeny vyvolané dlhodobým pôsobením namáhania prejavujú najvýraznejšie a zároveň sa dá spoľahlivo interpretovať ich závislosť od aplikovanej záťaže. Vďaka týmto poznatkom bolo možné pracovať na vývoji softvéru na analýzu nameraných dát, ktorý umožňuje ďalšie skúmanie vybraných magnetických parametrov, reagujúcich na zmeny v materiáloch v dôsledku pôsobenia rôznych záťaží.

Nasleduje zhrnutie dosiahnutých výsledkov a ich konfrontácia so stanovenými úlohami sformulovanými v tézach práce:

- *Vývoj softvérového nástroja pre analýzu nameraných dát, ktorého súčasťou je skúmanie zvolených elektromagnetických parametrov (najmä diferenciálnej permeability). Súčasťou je testovanie lineárnosti (resp. korelácie) zmeny parametra po aplikácii záťaže na skúmaný materiál.*

V rámci riešenia dizertačnej práce prebehol vývoj a úprava vyhodnocovacích softvérov, podľa aktuálnych požiadaviek. Pomocou týchto softvérových nástrojov bolo možné vyhodnocovať a porovnávať viaceré parametre opisujúce zmeny v materiáloch po aplikácii záťaže. Vyhodnocovali sme ich lineárnosť, monotónnosť, korelačné koeficienty a tiež boli použité viaceré metódy filtrovania a vyhladzovania údajov.

- *Súčasne s testovaním lineárnosti zvoleného parametra bude prínosné aj testovanie na iné typy závislostí, teda ľubovoľný tvar krivky. Vhodné bude napríklad aj použitie Pearsonovho korelačného koeficientu pre*

porovnanie závislostí diferenciálnej permeability a iných veličín, získaných tradičnými nedeštruktívnymi, ale aj deštruktívnymi metódami.

V súlade s formulovanými tézami dizertačnej práce bola realizovaná aj analýza alternatívnych typov závislostí ako lineárnej (resp. rôznych tvarov kriviek). Za týmto účelom bolo uskutočnené porovnanie troch korelačných koeficientov – Pearsonovho, Spearmanovho a Kendallovho. S cieľom eliminovať náhodne vznikajúce vysoké hodnoty, spôsobené delením malých čísel pri normalizácii matíc, boli zároveň testované viaceré prístupy na vyhladenie extrémnych hodnôt. Na základe analýzy nameraných údajov je súčasťou práce aj porovnanie diferenciálnej permeability, zvolenej za hodnotiaci parameter v prípade MAT metódy, so štandardnými magnetickými parametrami koercitívnej intenzity H_c a remanentnej indukcie B_r . Týmto porovnaním je preukázaná násobne vyššia citlivosť zvoleného parametra.

- *Overenie použitia meracej aparatury a jej prispôbenie pre meranie na magneticky otvorených vzorkách. Doposiaľ boli merania robené len na magneticky uzatvorených vzorkách kvôli eliminácii rôznych systematických chýb, spôsobených napr. existenciou demagnetizačného poľa, vplyvom rôznej geometrie magnetického obvodu a pod. Keďže dostupnosť takýchto vzoriek je, najmä v súčasnosti, problematická, vhodné bude meranie na omnoho dostupnejších Charpyho vzorkách (vzorky v tvare hranolov štandardizovaných rozmerov $(10 \times 10 \times 55 \text{ mm})$ s vytvoreným vrubom v tvare písmena „v“).*

Jedným z významných prínosov dizertačnej práce bolo realizovanie nových meraní na magneticky otvorených vzorkách (hranol $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$). Na uskutočnenie týchto meraní bola použitá identická meracia aparatura ako pri experimentoch s magneticky uzatvorenými vzorkami. Systém bol rozšírený o C-jadro vybavené budiacou a snímacou cievkou, ako aj o snímáciu cievku umiestnenú na vzorke. Nevyhnutné konštrukčné prvky pre upevnenie C-jadra a navínutie cievok boli navrhnuté a zhotovené pomocou 3D tlače.

- *Analýza nameraných údajov získaných meraním na magneticky otvorených vzorkách. Overenie možnosti použitia MAT metódy aj pre otvorené vzorky, k čomu je potrebné skúmanie vzťahu medzi magne-*

tizačným prúdom a intenzitou magnetického poľa vo vzorke a tiež skúmanie vzťahu medzi magnetickým tokom vo vzorke a v jarme.

V dizertačnej práci sa podarilo opísať vzťah medzi magnetizačným prúdom a intenzitou magnetického poľa vo vzorke a tiež vzťah medzi magnetickým tokom vo vzorke a v jarme. Medzi kľúčové výstupy patrí overenie možnosti nahradiť v rámci metódy MAT tradičnú hysteréznú slučku závislosťou magnetického toku v C-jadre od budiaceho prúdu pretekajúceho primárnou cievkou, pričom tento prúd má pomocou spätnej väzby definovaný trojuholníkový časový priebeh. Vďaka princípu metódy MAT, kedy sa merania relativizujú vzhľadom na prvé meranie bez aplikovanej záťaže, sú aspoň čiastočne eliminované systematické chyby. Tento prístup poskytuje veľmi robustné riešenie bez potreby precíznej kalibrácie magnetického obvodu z hľadiska intenzity magnetického poľa H alebo magnetickej indukcie B . Analýza získaných údajov priniesla zásadné poznatky, ktoré potvrdzujú, že metódu MAT možno aplikovať bez úprav aj na magneticky otvorené vzorky. Využitie vhodne tvarovaného C-jadra tak umožňuje určovať magnetické parametre vo vzorke, čím sa rozširujú možnosti využitia a aplikačný potenciál metódy.

Na základe doterajších výsledkov, je cieľom v budúcnosti ďalej rozvíjať možnosti skúmania magnetických parametrov pre potreby nedeštruktívnej defektoskopie. Keďže ide o rozsiahlu a komplexnú oblasť, otvára sa široký priestor pre ďalšie smerovanie výskumu. Takýto výskum môže byť prínosom najmä pre priemyselnú prax, kde je kladený dôraz na jednoduchosť, cenovú dostupnosť a prenosnosť takýchto nedeštruktívnych metód defektoskopie, kde sa metóda magnetického adaptívneho testovania zdá ako vhodný nástroj.

Zoznam publikácii autora

Publikácia

HRUŠKOVÁ, Lenka a UŠÁK, Elemír. An advanced software tool for analysis of experimental data obtained by magnetic adaptive testing (MAT) method: Non-destructive evaluation of micro-structural changes in ferromagnetic constructional materials. In: Alena, KOZÁKOVÁ. ELI-TECH '21. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, ISBN 978-80-227-5098-1.

Druh: prís. v zbor. *Kód KPČ:* AFD *Kód kategórie:* V2 *Rok:* 2021

HAŠKOVÁ, Lenka; UŠÁK, Elemír a UŠÁKOVÁ, Mariana. Sophisticated software analysis of magnetic quantities obtained by magnetic adaptive testing method. In: Jozef, SITEK; Ján, VAJDA a Igor, JAMNICKÝ. AP-COM 2022. Melville: AIP Publishing, 2023, ISBN 978-0-7354-4479-9.

Druh: prís. v zbor. *Kód KPČ:* AFD *Kód kategórie:* V2 *Rok:* 2023

UŠÁK, Elemír; HAŠKOVÁ, Lenka; VAŠUT, Daniel; UŠÁKOVÁ, Mariana. A Modification of Magnetic Adaptive Testing: Progressive Method for Non-destructive Inspection of Microstructural Changes in Ferromagnetic Constructional Materials. Journal of Nondestructive Evaluation, 42. s. 2023.

Druh: čl. v čas. *Kód KPČ:* ADC *Kód kategórie:* V3 *Rok:* 2023

KRUŽELÁK, Ján; KVASNIČÁKOVÁ, Andrea; DŽUGANOVÁ, Michaela; HAŠKOVÁ, Lenka; DOSOUDIL, Rastislav; HUDEC, Ivan. Curing, Properties and EMI Absorption Shielding of Rubber Composites Based on Ferrites and Carbon Fibres. Polymers, 15. s. 1-19.

Druh: čl. v čas. *Kód KPČ:* ADC *Kód kategórie:* V3 *Rok:* 2023

Publikácia

HAŠKOVÁ, Lenka a UŠÁK, Elemír. Non-Destructive Inspection of Steel-Based Structural Components: Exploring the Potential of Magnetic Adaptive Testing for Measurement and Metrology. In: Jozef, SITEK; Ján, VAJDA a Igor, JAMNICKÝ. APCOM 2024. Melville: AIP Publishing, 2024.

Druh: prís. v zbor. *Kód KPČ:* AFD *Kód kategórie:* V2 *Rok:* 2024

HAŠKOVÁ, Lenka; KVASNIČÁKOVÁ, Andrea; JESZEOVÁ, Klaudia; UŠÁKOVÁ, Mariana a UŠÁK, Elemír. Analysis of Selected Magnetic Characteristics of Europium Substituted LiZnTi Spinel Ferrites. In: Jozef, SITEK; Ján, VAJDA a Igor, JAMNICKÝ. APCOM 2023. Melville: AIP Publishing, 2024, ISBN 978-0-7354-4805-6.

Druh: prís. v zbor. *Kód KPČ:* AFD *Kód kategórie:* V2 *Rok:* 2024

Literatúra

- [1] Louis Cartz. *Nondestructive Testing: Radiography, Ultrasonics, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, Eddy Current*. ASM International, 1995. ISBN: 9780871705174. URL: <https://bit.ly/40U1G3u>.
- [2] I. Tomáš. “Non-destructive magnetic adaptive testing of ferromagnetic materials”. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (2004). Cit. 9 1 2022. URL: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(03\)00496-7](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(03)00496-7).
- [3] Lenka Hašková a Elemír Ušák. “Non-destructive inspection of steel-based structural components: Exploring the potential of magnetic adaptive testing for measurement and Metrology”. In: *APPLIED PHYSICS OF CONDENSED MATTER (APCOM 2024)*. Zv. 3251. AIP Publishing, 2024, s. 040015. DOI: 10.1063/5.0234815.
- [4] Patrick Schober, Christa Boer a Lothar A Schwarte. “Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation”. In: *Anesth. Analg.* 126.5 (máj 2018), s. 1763–1768.
- [5] Interstate Technology & Regulatory Council. *Groundwater Statistics and Monitoring Compliance, Statistical Tools for the Project Life Cycle*. <https://tinyurl.com/3wwuaw5j>. GSMC-1. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Groundwater Statistics and Monitoring Compliance Team. 2013.
- [6] Elemír Ušák et al. “A Modification of Magnetic Adaptive Testing: Progressive Method for Nondestructive Inspection of Microstructural Changes in Ferromagnetic Constructional Materials”. In: *Journal of Nondestructive Evaluation* 42.3 (sept. 2023). ISSN: 1573-4862. DOI: 10.1007/s10921-023-00994-2.
- [7] N. Saba, M. Jawaid a M.T.H. Sultan. “1 - An overview of mechanical and physical testing of composite materials”. In: *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites*

- and Hybrid Composites*. Ed. Mohammad Jawaaid, Mohamed Thariq a Naheed Saba. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2019, s. 1–12. ISBN: 978-0-08-102292-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1>. URL: <https://tinyurl.com/5k59jdz>.
- [8] C. J. Hellier. *Handbook of nondestructive evaluation*. Cit. 28 9 2021. 2003. URL: <http://bit.ly/45dHY30>.
 - [9] *Probably the most pleasing postcard in the company's history*. Cit. 18 9 2021. URL: <https://bit.ly/4omC21c>.
 - [10] *Short research about the history of eddy current*. Online. 2010. URL: <https://bit.ly/456zQUf>.
 - [11] David Lovejoy. *The history and basis of the magnetic particle testing method*. Springer Netherlands, 1993. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-011-1536-0_1.
 - [12] The Mathworks. *Documentation Center, System Identification Toolbox, Linear Model Identification, Input-Output Polynomial Models, Algorithms for Recursive Estimation*. User's manual. Online. 3.7.2014. 2014. URL: <https://bit.ly/41g0fef>.
 - [13] MathWorks. *LabVIEW Interface*. <https://tinyurl.com/2meyk8cz>. 2024.
 - [14] Steven Errede. *A Brief History of The Development of Classical Electrodynamics*. Online. <https://tinyurl.com/4p9y4nsb>. 2007.
 - [15] *Milestones in Ultrasound Diagnostics*. Online. <https://tinyurl.com/mwxxhm44>.
 - [16] P. Eykhoff. *System identification*. London: Willey a Sons, 1984.
 - [17] F. A. Firestone. *The Supersonic Reflectoscope, an Instrument for Inspecting the Interior of Solid Parts by Means of Sound Waves*. Cit. 5 11 2021. 1945. URL: <https://tinyurl.com/yc89e8sa>.
 - [18] E. Ušák. *Basic concepts in magnetism*. 2017.
 - [19] *Základné veličiny elektromagnetizmu*. Cit. 3 1 2022. 2009. URL: <https://tinyurl.com/4k8psra8>.

- [20] J. Tekel. *Základy fyziky*. Cit. 8 12 2022. 2014. URL: <https://tinyurl.com/mvhkmd8>.
- [21] A. Tirpák. *Elektromagnetizmus*. Bratislava, 2004.
- [22] Zuzana Müllerová. *J.C. Maxwell: Selected Works*. <https://tinyurl.com/mr43pwbj>. Cit. 16 10 2021. 2018.
- [23] S. Ling, J. Sanny a W. Mobes. *University Physics Volume 3*. Cit. 10 11 2022. 2022. URL: <https://tinyurl.com/kefcyyd3>.
- [24] J. Pišút, L. Gomolčák a V. Černý. *Úvod do kvantovej mechaniky*. Cit. 4 1 2022. 2008. URL: <https://tinyurl.com/mvvnfspd>.
- [25] A. Pietriková a J. Banský. *Základy inžinierstva materiálov*. Cit. 18 10 2021. URL: <http://web.tuke.sk/fei-kte/slovak/subjects/ZIM/Kapitola%2013%20-%20Magneticke%20materialy.pdf>.
- [26] R. Boča. “Types of Magnetic Materials”. In: (1999). Cit. 16 12 2021. URL: <https://tinyurl.com/yp633dze>.
- [27] J. Drápala a M. Kursá. *Elektrotechnické materiály*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [28] D. Ilkovič. *Fyzika II*. Bratislava: Alfa, 1973.
- [29] IEEE Magnetics Society. *Magnetic Units and Conversions*. <https://tinyurl.com/5n6tc2bt>. 2022.
- [30] V. Franco a B. Dodrill. *Magnetic Measurement Techniques for Materials Characterization*. Springer, 2021.
- [31] A. Hubert a R. Schäfer. *Magnetic Domains, The Analysis of Magnetic Microstructures*. Springer, 2009.
- [32] R. Feynman, R. Leighton a M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics, Volume II*. Cit. 29 11 2021. 1963. URL: <https://tinyurl.com/yn62c83s>.
- [33] *Public domain, via Wikimedia Commons*. Cit. 23 11 2021. 2008. URL: <https://tinyurl.com/arj5dzk2>.
- [34] R. Singh. “Magnetic particle testing”. In: (2020). Cit. 12 10 2021. URL: <https://tinyurl.com/36hd5ms9>.
- [35] *Magnetic Particle Inspection (MPI)*. Cit. 3 11 2021. URL: <https://tinyurl.com/4uam47ew>.

- [36] Z. Wang, Y. Gu a Y. Wang. “A review of three magnetic NDT technologies”. In: (2011). Cit. 9 11 2021. URL: <https://tinyurl.com/mr3bney8>.
- [37] P. Rostron. “Critical Review of Pipeline Scale Measurement Technologies”. In: (2018). Cit. 15 11 2021. URL: <https://tinyurl.com/yfj3e33w>.
- [38] F. Al-Naemi, J. Hall a A. Moses. “FEM modelling techniques of magnetic flux leakage-type NDTfor ferromagnetic plate inspections”. In: (2006). Cit. 28 10 2021. URL: <https://tinyurl.com/mrybar3k>.
- [39] *Stresstech Bulletin 1: Barkhausen Noise Analysis*. Cit. 2021 9 25. URL: <https://tinyurl.com/43r2y3vp>.
- [40] L. Schmidová. “Analýza integrity povrchu broušených ozubených kol pomocí analýzy Barkhausenova šumu a rentgenové difrakce”. In: (2015). Cit. 16 9 2021. URL: <https://tinyurl.com/3h9mxzvt>.
- [41] D. Buttle et al. “Magnetoacoustic and Barkhausen emission in ferromagnetic materials”. In: (1986). Cit. 15 9 2021. URL: <https://tinyurl.com/358wrhky>.
- [42] D. Jiles. “Review of magnetic methods for nondestructive evaluation (Part 2)”. In: (1990). Cit. 1 12 2021. URL: <https://tinyurl.com/25ey8kuj>.
- [43] L. Piotrowski, M. Chmielewski a B. Augustyniak. “On the correlation between magnetoacoustic emission and magnetostriction dependence on the applied magnetic field”. In: (2016). Cit. 8 10 2021. URL: <https://tinyurl.com/3rbaw69f>.
- [44] *Remote Field Through Wall Inspection Technique*. Cit. 15 9 2021. 2002. URL: <https://tinyurl.com/5bnnccyk>.
- [45] P. J. Shull. *Nondestructive Evaluation Theory, Techniques, and Applications*. Cit. 2 10 2021. 2002. URL: <https://bit.ly/3A9NMtS>.
- [46] L. Hrušková a E. Ušák. “An Advanced Software Tool for Analysis of Experimental Data Obtained by Magnetic Adaptive Testing (MAT) Method”. In: *Proceedings of ELITECH '21*. Bratislava, 2021.
- [47] *Third Party Products & Services - LabVIEW*. Cit. 8 12 2022. URL: <https://tinyurl.com/2meyk8cz>.

- [48] S. Liu et al. “Quantitative MFL characterization study in hard magnetic material surface topography measurement”. In: (2018). Cit. 6 11 2021. URL: <https://tinyurl.com/35yawxfs>.
- [49] D. Jiles. *Review of magnetic methods for nondestructive evaluation*. Cit. 4 10 2021. 1988. URL: <https://bit.ly/3EaFjbN>.
- [50] Encyklopédia Beliana. *Koercitivita*. <https://tinyurl.com/me4w5a7m>. Cit. 05 01 2022. 2024.
- [51] Encyklopédia Beliana. *Barkhausenov jav*. <https://tinyurl.com/psj3sfp4>. 2024.
- [52] B. D. Cullity a C. D. Graham. *Introduction to Magnetic Materials*. 2nd. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. ISBN: 978-0471477419. DOI: 10.1002/9780470386323.
- [53] T. Scepka. “Noninvasive control of magnetic state in ferromagnetic nanodots by Hall probe magnetometry”. In: (2016). Cit. 29 9 2021. URL: <https://tinyurl.com/2nutakew>.
- [54] K. Reber a A. Bonisch. “Inspection of unusual Pipe Types with Eddy Current Technologies”. In: (2010). Cit. 7 11 2021. URL: <https://tinyurl.com/3mefnc47>.
- [55] E. Ušák. “Comparasion of Selected Methods for Non-destructive Evaluation of Structural Degradation of Constructional Ferromagnetic Materials”. In: *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING* (2015). Cit. 4 1 2022. URL: <https://tinyurl.com/44h5h57s>.
- [56] D. Vašut, E. Ušák a M. Ušáková. “Magnetic properties of thermally treated ring-shaped steel samples”. In: *Proceedings of ELITECH '17*. Bratislava, 2017.
- [57] P. Rizzo. “16 - Sensing solutions for assessing and monitoring railroad tracks”. In: *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*. Ed. M.L. Wang, J.P. Lynch a H. Sohn. Zv. 56. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. Woodhead Publishing, 2014, s. 497–524. ISBN: 978-1-78242-242-6. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781782422433.2.497>. URL: <https://tinyurl.com/3jbu2xze>.

- [58] MathWorks. *smoothdata - Smooth noisy data*. <https://tinyurl.com/mw7muxyy>. Accessed: 2024-06-25. 2024.
- [59] MathWorks. *corr: Correlation Coefficients*. <https://tinyurl.com/3dwmu7n6>. Accessed: 2024-03-25. 2024.
- [60] Karl Pearson. “Mathematical Contributions to the Theory of Evolution. III. Regression, Heredity, and Panmixia”. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 187.253-318 (1896), s. 253–318. DOI: 10.1098/rsta.1896.0007.
- [61] Maurice G. Kendall. “A New Measure of Rank Correlation”. In: *Biometrika* 30.1-2 (1938), s. 81–93. DOI: 10.2307/2332226.
- [62] Charles Spearman. “The Proof and Measurement of Association between Two Things”. In: *The American Journal of Psychology* 15.1 (1904), s. 72–101. DOI: 10.2307/1412159.
- [63] Karol Hilko. *Pokročilé metódy identifikácie magnetických vlastností feromagnetických materiálov so zameraním na ich štrukturálnu diagnostiku*. <https://tinyurl.com/mwudsefv>. 2024.
- [64] Elemír Ušák et al. “Analysis of capabilities of small double-yoke single sheet tester”. In: *Journal of Electrical Engineering* 59 (jan. 2008), s. 21–24.