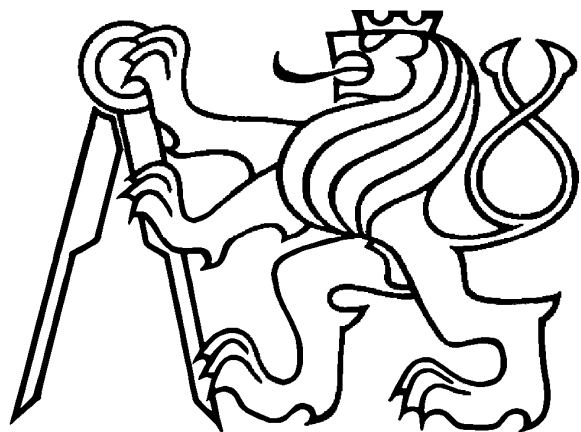


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra teorie obvodů

Ivana Nová

**MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ HYSTEREZE
A JEHO VYUŽITÍ PŘI MĚŘENÍ OTEVŘENÝCH VZORKŮ
MAGNETICKY MĚKKÝCH MATERIÁLŮ**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Teoretická elektrotechnika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, srpen 2012

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na katedře teorie obvodů Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ivana Nová
Katedra elektrických pohonů a trakce
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: Prof. Ing. Ivan Zemánek, CSc.
Katedra teorie obvodů
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, 166 27 Praha 6

Oponenti:
.....
.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Teoretická elektrotechnika v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

Prof. Ing. Václav Havlíček, CSc.
předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Teoretická elektrotechnika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

OBSAH

1	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	5
1.1	Modely magnetické hystereze.....	6
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	7
3	METODY ZPRACOVÁNÍ.....	8
3.1	Tvorba nových analytických modelů hystereze.....	8
3.2	Modifikovaný hyperbolický model s flexibilními parametry	10
3.3	Přímý analytický model s flexibilními parametry.....	11
3.4	Inverzní analytický model s flexibilními parametry	13
3.5	Modely s aproximovanými parametry	14
3.6	Testování vlastností modelů	15
4	VÝSLEDKY	18
5	ZÁVĚR	20
	Seznam v tezích použité literatury	22
	Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci	23
	Seznam ostatních publikací.....	25
	Bez ohlasů a recenzí	25
	SUMMARY.....	26
	RESUMÉ.....	27

1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Magneticky měkké materiály patří mezi nejdůležitější konstrukční prvky používané v elektrotechnice. Jejich parametry výrazně ovlivňují kvalitu finálních zařízení. K nejvýznamnějším charakteristikám těchto materiálů při střídavém magnetování patří dynamická hysterezní smyčka a s ní související parametry [1], které je nutné co nejpřesněji měřit, a to za přesně definovaných magnetovacích podmínek.

Současný vývoj směřuje k průběžným měřičům, které je možno využívat přímo ve výrobním procesu. Důraz je kladen na automatizované on-line

měření požadovaných parametrů. Žádoucí buzení je obvykle postupně nastavováno pomocí numerických iteračních metod [1].

Při přibližné znalosti chování testovaného materiálu by bylo možné nastavovat magnetovací parametry rychleji. Jednou z možností je náhrada chování reálného feromagnetického materiálu modelem.

1.1 Modely magnetické hystereze

Problematika modelování magnetické hystereze je komplikovaná. Kromě výrazné nelinearity, hystereze a vlivu magnetovacích podmínek se uplatňují různé fyzikální činitele. U modelů dynamických je třeba brát v úvahu také jevy související se střídavým magnetováním.

Z hlediska složitosti lze modely rozdělit zhruba do těchto skupin:

Analytické modely hystereze

Snaží se vystihnout chování feromagnetika nalezením co nejvhodnějšího matematického vztahu vstup/výstup pomocí matematických funkcí. Jde o metody výpočetně jednoduché, rychlé, mnohé z nich však neberou zřetel na fyzikální podstatu dějů v magnetickém materiálu. Můžeme sem zařadit např.:

- Rayleighův model [2].
- Frölichův model [2].
- Modelování jednoduchými matematickými funkcemi [2].
- Metodu pomocných funkcí [2].
- Takácsův hyperbolický model [3], [4]. (Propracovanější varianty tohoto modelu, např. [5], lze řadit již k modelům makroskopickým.)

Makroskopické modely hystereze

Jsou složitější než modely analytické. Obsahují (zjednodušený) fyzikální základ. Většina makroskopických modelů vychází z existence magnetických domén. Některé modely pracují s pojmem tzv. efektivního pole uvnitř feromagnetika. Jiné modely zavádějí hypotetické jednotky bez fyzikální podstaty (operátory), které však jsou v rámci modelu účelné. Podle způsobu řešení mohou být makroskopické modely zhruba rozděleny do těchto tříd:

- Vektorové modely (např. Stoner-Wohlfartův model [2]).
- Operátorové modely (např. Preisachův [6] a Prandtl-Ishlinského model).
- Diferenciální modely (např. Duhemův model [2], Hodgdonův model [2], Jiles-Athertonův model [2], Chuův model [2]).
- Modely založené na jiném principu a kombinované modely.

Mikromagnetické modely hysterese

Jsou nejdetailejší a nejsložitější. Mají precizní fyzikální základ, používají se zejména na specializovaných vědeckých pracovištích a jejich výpočty jsou složité. Pro technické účely jsou příliš komplikované.

Jiné způsoby rozdělení modelů hysterese

Modely magnetické hysterese můžeme rozdělit i jinak, např. na statické a dynamické, skalární a vektorové, deterministické a stochastické. Podle typu zkoumané závislosti lze rozlišit (převažující) modely přímé, u nichž je nezávisle proměnnou intenzita magnetického pole H , a modely inverzní, kde nezávisle proměnnou představuje magnetická indukce B (resp. M nebo J) [7].

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem práce je navrhnout a ověřit v praxi nový analytický model (modely) hysterese při střídavém magnetování, použitelný (použitelné) pro tři hlavní skupiny magneticky měkkých materiálů (klasická křemíková ocel, materiály typu Fe-Ni a amorfní materiály s vysokým obsahem kobaltu).

Hlavním požadavkem na nový model (modely) je jeho (jejich) snadná implementovatelnost do řídicího a měřicího programu univerzálního měřiče otevřených vzorků magneticky měkkých materiálů – ferometru KF9a, vyvinutého na katedře teorie obvodů FEL ČVUT [1].

Model má být použit v on-line aplikaci a sloužit při realizaci rychlých měřicích algoritmů. Proto jeho výpočet nemá být příliš komplikovaný a časově náročný a implementace modelu nemá být neúměrně složitá. Hledaný model má fungovat pro běžný rozsah amplitud budicího signálu a frekvencí jak v běžném (přímém), tak v inverzním režimu. Přitom je možno učinit některá zjednodušení:

- Není nutné, aby model řešil tvorbu obecných hysterezních křivek. Z důvodu střídavého magnetování bez stejnosměrné složky postačí modelovat pouze symetrické hysterezní smyčky.
- Je možné se omezit na buzení harmonickým signálem, což je v měřiči KF9a zajištěno digitální a analogovou korekcí [8].
- Není třeba uvažovat anizotropii, použitý měřicí systém předpokládá měření pouze ve směru snadné osy magnetování.

Zadání lze teoreticky řešit některými stávajícími metodami (Preisachův dynamický model a řada modelů diferenciálních). Potíž může spočívat v nesnadné implementaci modelu, zdlouhavosti výpočtu a v komplikované identifikaci parametrů. Z tohoto hlediska by implementace zmíněných modelů s sebou přinesla řadu obtíží.

Vzhledem k tomu, že nejjednodušší způsob popisu magnetizačních křivek představují analytické aproximační modely, které jsou rychlé a implementačně jednoduché, bylo by žádoucí použít právě tuto třídu modelů. Takový model by neobsahoval diferenciální rovnice. Většina existujících analytických modelů však funguje uspokojivě pouze při kvazistatickém magnetování. Jedinou výjimkou je dynamická verze Takácsova modelu [5], kterou však již můžeme přiřadit k modelům diferenciálním.

Proto se hlavním cílem této práce stalo vytvoření relativně jednoduchých nediferenciálních analytických modelů, které bude možno popsat několika parametry a které dokáží modelovat dynamické hysterezní smyčky. Pro dosažení hlavního cíle práce je třeba realizovat následující kroky:

- Návrh vhodných analytických funkcí. Funkce by měly být flexibilní, ne příliš složité, s přijatelným počtem parametrů.
- Nalezení optimálních parametrů. Parametry ve většině případů nebudou konstantní, nýbrž budou závislé na amplitudě buzení B_a a na frekvenci f .
- Předpokládá se, že v rámci určité třídy materiálů bude chování parametrů podobné, avšak tento předpoklad je třeba ověřit.
- Závislosti parametrů je třeba aproximovat vhodnou analytickou funkcí a dosadit aproximované parametry do původního modelu.
- Vyhodnocení vlastností modelů z různých hledisek (přesnost simulace hysterezní smyčky, odhad amplitudy B_a a měrných ztrát p).
- Posouzení možnosti implementace navržených modelů pro účely zrychlení měřicího algoritmu ferometru KF9a.

3 METODY ZPRACOVÁNÍ

Při návrhu analytických modelů, předkládaných v této práci, byl použit čistě matematický přístup, bez ohledu na fyzikální podstatu magnetizačních procesů. Vlivy spojené se střídavým magnetováním jsou zahrnuty v parametrech navrhovaných modelů. Ty mají charakter proměnných (nejsou konstantní), a z toho důvodu lze hovořit o *modelech s flexibilními parametry*.

3.1 Tvorba nových analytických modelů hysterese

Obecný postup při tvorbě modelu

Tvorba modelu vychází z naměřených hysterezních smyček. Následuje volba analytických funkcí – jednotlivých složek, tvořících navrhovaný model.

V první fázi modelování jsou hledány optimální *lokální parametry* modelu – vždy pro jednu určitou frekvenci f a pro jednu konkrétní amplitudu magnetické indukce B_a . Samotné lokální parametry jsou zjišťovány ve dvou fázích. Nejprve je třeba získat prvotní přijatelné odhady parametrů, což je

řešeno proložení bodů hysterezní smyčky pomocí ručně ovládaného uživatelského rozhraní v MATLABu. Pak jsou zjištěné odhady dosazeny jako počáteční hodnoty a optimalizovány nástroji programu MATLAB.

Závislost modelu na amplitudě magnetické indukce a frekvenci je skryta v *chování parametrů*, které jsou ve skutečnosti *funkcemi* B_a a f .

Proto je v dalším kroku sledován průběh a tvar závislostí nalezených parametrů. Bude-li průběh parametrů vykazovat zřetelný trend, půjde vyjádřit vliv B_a a f prostřednictvím *aproximace lokálních hodnot parametrů* jednoduchými funkčními závislostmi.

Po nalezení závislosti parametrů je možno vypočítat jejich hodnoty i pro jiná B_a a f . *Konečný model* pracuje s takto *aproximovanými parametry*.

Vstupní data, identifikace a aproximace parametrů

Dříve, než je možno přistoupit k tvorbě modelu pro konkrétní materiál, je třeba naměřit série hysterezních smyček, z nichž bude vycházet identifikace modelu. V rámci této práce byly získány hysterezní smyčky magneticky měkkých materiálů tří různých typů:

- *Orientovaný transformátorový plech* Eo 10 [9] s vysokým obsahem Si. Materiál je výrazně anizotropní. Byl měřen ve směru snadné osy magnetování při amplitudách $B_a = 0.1 \text{ T} - 1.7 \text{ T}$ a f od 40 Hz do 400 Hz.
- *Materiál typu Fe-Ni*. K dispozici byly dva vzorky rozdílného složení [10] – FeNi42 a FeNi47Cu5. Oba byly měřeny při $B_a = 0.2 \text{ T} - 1.2 \text{ T}$, $f = 50 \text{ Hz}$.
- *Amorfni materiál s vysokým obsahem Co*, konkrétně $\text{Co}_{85}\text{Fe}_6\text{B}_2\text{Si}_6$. Jde o experimentální vzorek z výroby ČERMET Moskva. Smyčky byly měřeny pro $B_a = 0.1 \text{ T} - 0.8 \text{ T}$, $f = 2 \text{ kHz} - 5 \text{ kHz} - 10 \text{ kHz}$.

Po získání naměřených hysterezních smyček je dalším krokem *nalezení lokálních parametrů* pro každou měřenou amplitudu B_a a pro každou frekvenci f zvlášť. Jednotlivé funkční složky modelu netvoří ortogonální systém (jako je tomu např. u Fourierovy řady), a proto není rozklad jednoznačný. Může existovat více vhodných řešení, v závislosti na výchozím odhadu parametrů. Proto má prvotní odhad parametrů takovou důležitost.

K získání prvotního věrohodného odhadu bylo pro každý model vytvořeno jednoduché uživatelské rozhraní (GUI) v programu MATLAB.

Po zjištění prvotního odhadu lze přistoupit k optimalizaci parametrů. Přitom se dají využít existující optimalizační nástroje programu MATLAB. Z nich byl v rámci této práce použit Genetic Algorithm Tool [11], pro jehož správnou funkci byly naprogramovány účelové funkce.

Při modelování závislosti parametrů byly nejprve vyzkoušeny aproximační polynomy až do pátého stupně. U části parametrů se však lépe osvědčily racionální lomené funkce druhého stupně (v čitateli i ve

jmenovateli). Požadované koeficienty aproximačních funkcí byly hledány pomocí nástroje Curve Fitting Tool v MATLABu.

3.2 Modifikovaný hyperbolický model s flexibilními parametry

Východiskem modifikovaného hyperbolického modelu je Takácsův model hystereze, resp. jeho vícesložková varianta [12], [13], [14], konstruující přímou hysterezní smyčku pomocí dvou nebo tří hyperbolických funkcí. Závislost $B_{\pm} = f(H)$ můžeme popsat následujícími rovnicemi:

$$B_{\pm n} = \sum_{i=1}^n (A_i f_{\pm i} \pm d_i), \quad (3.1)$$

$$f_{\pm i} = \tanh[\alpha_i (H \mp a_{0i})], \quad (3.2)$$

$$d_i = \frac{A_i}{2} [f_{-i}(H_a) - f_{+i}(H_a)] = \frac{A_i}{2} [\tanh(\alpha_i (H_a + a_{0i})) - \tanh(\alpha_i (H_a - a_{0i}))]. \quad (3.3)$$

Přitom A_i označuje amplitudu jednotlivé hyperbolické složky, α_i její sklon a a_{0i} šířku (koercitivní sílu). Vstupní veličinou je intenzita magnetického pole s amplitudou H_a . Pro reálný materiál je $n = 2$ příp. $n = 3$. V případě difference d_i nejde o parametr, nýbrž o konstantu, jejíž hodnota vyplývá z požadavku návaznosti v koncových bodech hysterezní smyčky.

Pro vystižení tvaru menších smyček byla k doplnění hyperbolického modelu navržena nová tzv. eliptická složka, jejíž základ tvoří sudá funkce

$$f_0 = \left| 1 - \left(\frac{H}{H_a} \right)^{2k} \right|. \quad (3.4)$$

Konkrétní průběh funkce f_0 je výrazně ovlivněn parametrem k . Po vynásobení váhou A_0 dostaneme eliptickou složku modelu, která je označena jako g_0 .

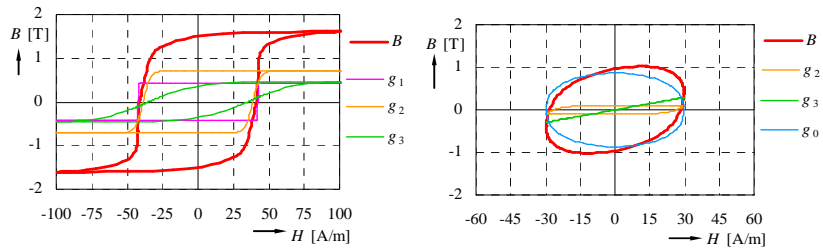
Modifikovaný hyperbolický Takácsův model lze po přidání nové eliptické složky zapsat jako

$$B_{\pm n} = \sum_{i=1}^n g_i(H) + g_0(H) = \sum_{i=1}^n [A_i \tanh(\alpha_i (H \mp a_{0i})) \pm d_i] \mp A_0 f_0, \quad (3.5)$$

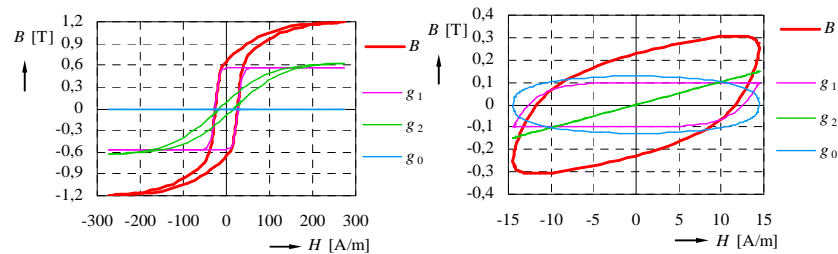
přičemž eliptická složka zvyšuje počet parametrů modelu o dva (A_0 a k) na celkový počet 8 ($n = 2$ hyperbolické složky) event. na 11 ($n = 3$).

Všechny hyperbolické složky modelu g_1 , g_2 , příp. g_3 jsou liché a mají vliv na sigmoidní tvar a sklon výsledné smyčky. Eliptická složka g_0 zajišťuje zaoblené tvary hysterezních smyček při menších hodnotách B_a .

Příklady vlivu nové eliptické složky na výsledný tvar simulovaných hysterezních smyček (pro $n = 3$ a $n = 2$ hyperbolické složky) jsou ukázány na obr. 3.1 a na obr. 3.2 pro různé úrovně B_a .



Obr. 3.1 Jednotlivé složky hysterezní smyčky, modifikovaný hyperbolický model se třemi hyperbolickými složkami



Obr. 3.2 Jednotlivé složky hysterezní smyčky, modifikovaný hyperbolický model se dvěma hyperbolickými složkami

3.3 Přímý analytický model s flexibilními parametry

Přímý model s flexibilními parametry vznikl podle původního návrhu autorky této práce. Řešení bylo v zásadě inspirováno modifikovaným hyperbolickým Takácsovým modelem. Výsledná hysterezní smyčka je superponována ze tří složek:

$$B_{\pm} = g_0(H) + g_1(H) + g_2(H) + g_3(H) . \quad (3.6)$$

Označení B_+ a B_- znamená rostoucí a klesající větve hysterezní smyčky.

Eliptická složka g_0 byla v podstatě převzata z předchozího modelu. Vystihuje zaoblený tvar menších dynamických smyček. Vyžaduje dva parametry – amplitudu A_0 a exponent k ovlivňující její výsledný tvar:

$$g_0 = \mp A_0 \left| 1 - \left(\frac{H}{H_a} \right)^2 \right|^k . \quad (3.7)$$

Tangenciální složka g_1 je založena na odmocnině z funkce arkustangens (samotná inverzní tangenta nedosahuje potřebného tvaru). Charakterizuje sigmoidní tvar smyček s výraznou saturací, a je definována vztahem:

$$g_1 = A_1 \frac{2}{\pi} \text{sign}[\alpha_1 (H \mp a_{01})] \text{atan} \left[\left| \alpha_1 (H \mp a_{01}) \right|^{\frac{1}{2}} \right] + d_1 . \quad (3.8)$$

Složku g_1 ovlivňují tři parametry: A_1 označuje její kladnou limitní hodnotu, α_1 řídí její strmost, a_{01} charakterizuje koercitivitu (tedy posun tangenciální složky ve směru osy H). V případě difference d_1 jde o konstantu potřebnou k tomu, aby se v koncových bodech smyčky ($H = H_a$, $H = -H_a$) funkční hodnoty shodovaly a aby tvar složky g_1 byl uzavřený:

$$d_1 = \frac{A_1}{\pi} \left[\text{atan} \left(\left| \alpha_1 (H_a + a_{01}) \right|^{\frac{1}{2}} \right) - \text{atan} \left(\left| \alpha_1 (H_a - a_{01}) \right|^{\frac{1}{2}} \right) \right] . \quad (3.9)$$

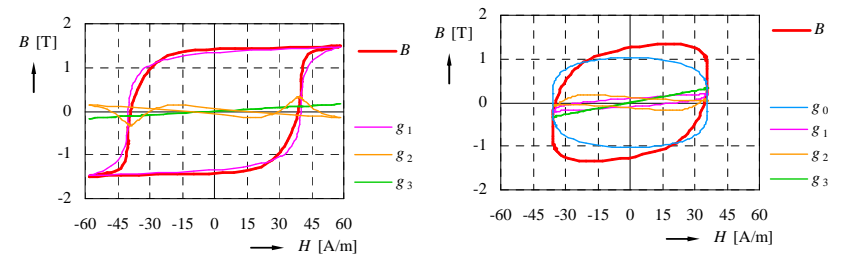
Korekční složka g_2 byla původně určena k úpravě ohbí hysterezních smyček při větších hodnotách B_a , zejména v okolí bodu H_c , ale výrazně se uplatňuje i při modelování menších smyček:

$$g_2 = \mp A_2 \frac{2 \left| \alpha_2 (H \mp a_{02}) \right|}{1 + \left| \alpha_2 (H \mp a_{02}) \right|^2} \pm d_2 . \quad (3.10)$$

Parametr A_2 znamená váhu korekční složky, parametr α_2 její strmost a parametr a_{02} posun centrálního bodu funkce g_2 ve směru osy B . Poslední součástí modelu je *lineární složka* g_3 , představující sklon výsledné smyčky:

$$g_3 = A_3 H . \quad (3.11)$$

Model v své nejpropracovanější verzi obsahuje devět parametrů; jejich počet lze však snížit při určitých zjednodušeních až na sedm. Na obr. 3.3 jsou znázorněny příklady simulovaných smyček s oddělenými složkami.



Obr. 3.3 Jednotlivé složky hysterezní smyčky, přímý analytický model

3.4 Inverzní analytický model s flexibilními parametry

Inverzní analytický model vznikl (stejně jako přímý analytický model) podle původního návrhu. Inverzní smyčka je superponována ze tří složek:

$$H_{\pm} = h_1(B) + h_2(B) + h_3(B) . \quad (3.12)$$

Označení H_+ a H_- odpovídá rostoucí a klesající větvi hysterezní smyčky. Složka h_1 , založená na kvadrátu funkce tangens, je lichá:

$$h_1 = A_1 \cdot \text{sign}(B \mp a_{01}) \cdot \left(\tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{B \mp a_{01}}{B_{\max}}\right) \right)^2 \pm d_1 . \quad (3.13)$$

Parametr A_1 má význam váhy, a_{01} definuje vodorovný posun složky h_1 ve směru osy B (ve smyslu remanentní indukce B_r). Parametr B_{\max} zajišťuje tvarovou flexibilitu složky h_1 . Diferenční konstanta d_1 v rovnici (3.13) nepatří mezi parametry (slouží jen k uzavření tvaru tangenciální složky h_1):

$$d_1 = \frac{A_1}{2} \left(\tan^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{B_a + a_{01}}{B_{\max}}\right) - \tan^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{B_a - a_{01}}{B_{\max}}\right) \right) . \quad (3.14)$$

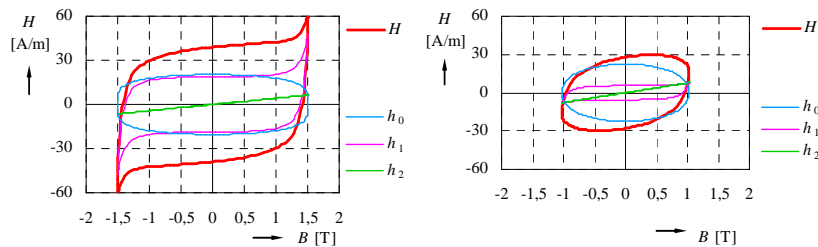
Sudá eliptická složka h_0 je stejná jako v předchozích dvou modelech a reprezentuje zaoblený tvar malých inverzních smyček:

$$h_0 = \pm A_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{B}{B_a} \right)^2 \right)^k . \quad (3.15)$$

Složka h_3 je lineární a představuje sklon výsledné smyčky:

$$h_3 = A_2 \cdot B . \quad (3.16)$$

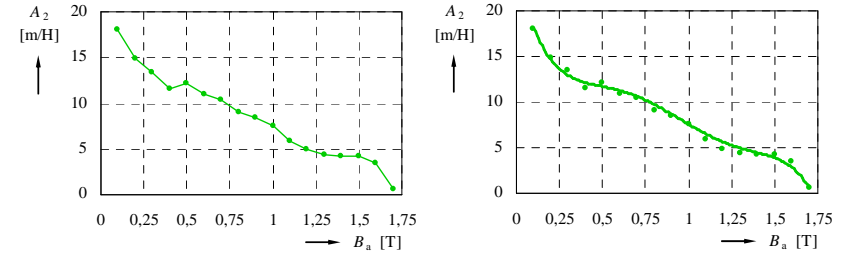
Pro věrohodnou aproximaci tvaru inverzní smyčky je u inverzního analytického modelu zapotřebí jen šesti parametrů: $A_0, k, A_1, a_{01}, B_{\max}, A_2$. Na obr. 3.4 jsou znázorněny příklady smyček s oddělenými složkami:



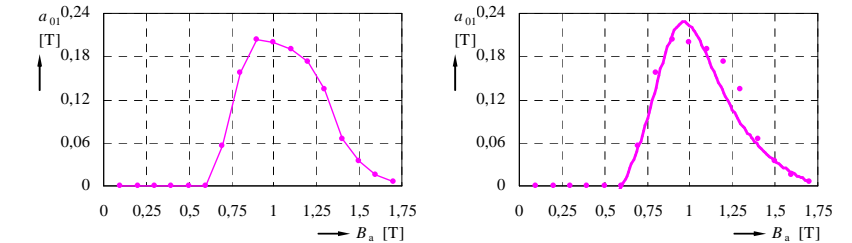
Obr. 3.4 Jednotlivé složky hysterezní smyčky, inverzní analytický model

3.5 Modely s aproximovanými parametry

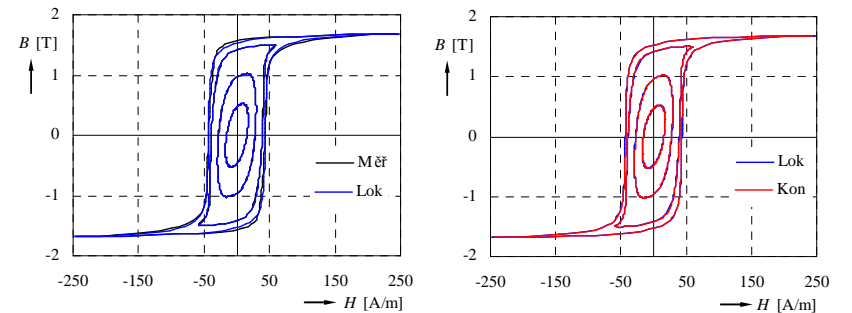
Jako ukázka aproximace parametrů je uvedena na obr. 3.5 aproximace parametru A_2 inverzního analytického modelu polynomem 5. řádu a na obr. 3.6 aproximace parametru a_{01} racionální lomenou funkcí (vychází-li hodnota aproximační funkce záporná, je vynulována). Parametrů je ve skutečnosti 6. Grafy na obr. 3.7 srovnávají naměřená data s lokálním a konečným modelem.



Obr. 3.5 Závislost parametru A_2 na B_a při $f = 50$ Hz a aproximace jeho závislosti polynomem pátého řádu. Inverzní analytický model. Materiál Eo 10.



Obr. 3.6 Závislost parametru a_{01} na B_a při $f = 50$ Hz a aproximace jeho závislosti racionální lom. funkcí 2. řádu. Inverzní analytický model. Materiál Eo 10.



Obr. 3.7 Měření, lokální a konečná simulace. Materiál Eo 10, $B_a = 0.5$ T – 1.0 T – 1.5 T – 1.7 T, $f = 50$ Hz, inverzní analytický model.

3.6 Testování vlastností modelů

Odchyly mezi simulovanými a naměřenými hodnotami lze posoudit z několika hledisek. Především je to střední kvadratická odchylka $RMSD$, která je měřítkem podobnosti mezi naměřeným a simulovaným tvarem smyčky. Rovnice (3.17) platí pro modifikovaný hyperbolický model a přímý analytický model, vztah (3.18) pro inverzní analytický model.

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (B_{i \text{ simul}} - B_i)^2} \quad (3.17)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{i \text{ simul}} - H_i)^2} \quad (3.18)$$

Tutéž odchylku lze vztáhnout k naměřené hodnotě B_a (příp. H_a), kde se výrazněji projeví odchylka tvaru menších smyček:

$$\delta_{RMSD} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (B_{i \text{ simul}} - B_i)^2}}{B_a} \cdot 100\% \quad (3.19)$$

$$\delta_{RMSD} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{i \text{ simul}} - H_i)^2}}{H_a} \cdot 100\% \quad (3.20)$$

O přesnosti simulace vypovídá také odchylka odhadu měrných ztrát:

$$\delta_p = \frac{P_{\text{simul}} - P}{P} \cdot 100\% \quad (3.21)$$

Konečně lze simulaci zhodnotit z hlediska odhadu amplitudy B_a resp. H_a :

$$\delta_{B_a} = \frac{B_{a \text{ simul}} - B_a}{B_a} \cdot 100\% \quad (3.22)$$

$$\delta_{H_a} = \frac{H_{a \text{ simul}} - H_a}{H_a} \cdot 100\% \quad (3.23)$$

Ke vzájemnému porovnání modelů se lépe hodí relativní odchylky. Pro demonstraci jsou na obr. 3.8, obr. 3.9 ukázány všechny čtyři typy odchylek pro modifikovaný hyperbolický model (materiál Eo 10, $f = 50$ Hz).

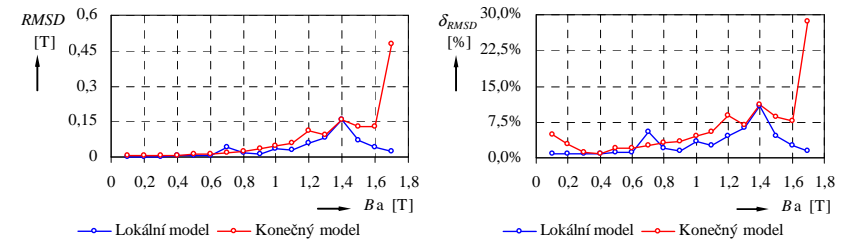
Na obr. 3.8, obr. 3.9 je zajímavé sledovat průběhy odchylek lokálního a konečného v závislosti na B_a . Pro lokální model je nejobtížnější simulace tvarů smyček kolem 1.3 T – 1.4 T, kde u materiálu Eo 10 pro $f = 50$ Hz

hysterezní smyčka mění tvar ze zaobleného na sigmoidní (ukazuje se to na odchylkách $RMSD$ a δ_{RMSD}). Na odchylce δ_p se to však nemusí projevit vůbec (smyčky s odlišným tvarem mohou mít podobnou plochu). Obrázky také ukazují, jaký vliv má aproximace parametrů na zvětšení odchylek u konečného modelu s aproximovanými parametry.

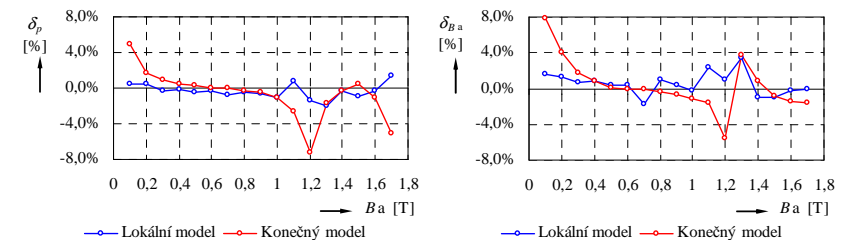
Kromě absolutních a relativních odchylek je dobrým vodítkem k posouzení kvality simulace také vizuální porovnání simulovaných průběhů s naměřenými. Vybrané ukázky simulace pro tři různé materiály a modely jsou na obr. 3.10, obr. 3.11 a obr. 3.12.

Z obr. 3.10 je zřejmá značná flexibilita modifikovaného hyperbolického modelu, s výjimkou tzv. Barkhausenovy nestability [5] (oblast se zápornou diferenciální permeabilitou, na obrázku vlevo označena fialovou šipkou). Tuto situaci neřeší ani jeden z vytvořených modelů.

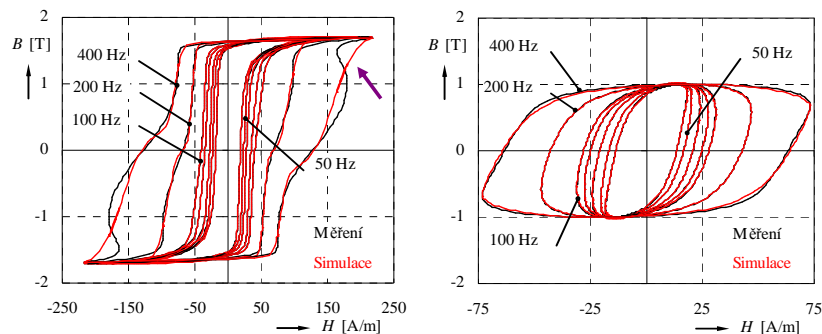
Na obr. 3.11 vpravo je ukázána přehnaná strmost simulovaných smyček v okolí bodu H_c u přímého analytického modelu (tuto vlastnost má rovněž inverzní analytický model). Na obr. 3.12 je demonstrována simulace amorfního materiálu inverzním analytickým modelem při různé B_a a f .



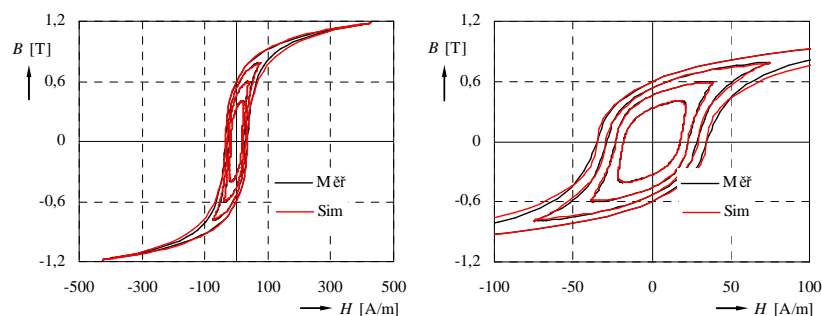
Obr. 3.8 Odchyly $RMSD$ a δ_{RMSD} , modifikovaný Takácsův model se třemi hyperbolickými složkami, materiál Eo 10, $f = 50$ Hz



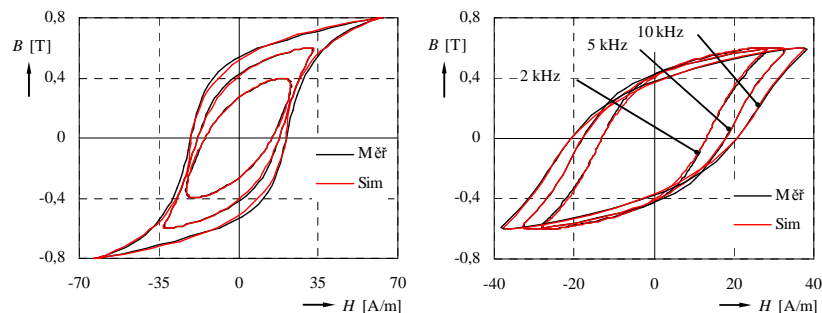
Obr. 3.9 Odchyly δ_p a δ_{B_a} , modifikovaný Takácsův model se třemi hyperbolickými složkami, materiál Eo 10, $f = 50$ Hz



Obr. 3.10 Simulace modifikovaným Takácsovým modelem se třemi hyperb. složkami při $B_a = 1.7$ T a 1.0 T, frekvence od 40 Hz do 400 Hz, materiál Eo 10.



Obr. 3.11 Simulace přímým analytickým modelem při $B_a = 0.4$ T až 1.2 T, frekvence 50 Hz, materiál FeNi47Cu5.



Obr. 3.12 Simulace inverzním analytickým modelem. Vlevo $B_a = 0.4$ T–0.6 T–0.8 T, $f = 5$ kHz, vpravo $B_a = 0.6$ T, $f = 2$ kHz, 5 kHz a 10 kHz, mat. $\text{Co}_{85}\text{Fe}_6\text{B}_2\text{Si}_6$.

4 VÝSLEDKY

Výsledkem práce je úprava jednoho stávajícího a návrh dvou nových matematických modelů hysterese, popisujících chování magneticky měkkých materiálů při střídavém magnetování.

Tvorba nových modelů

Po analýze stávajících modelů hysterese se možné přístupy k řešení (dynamický Preisachův model a modely diferenciální) ukázaly jako nepříliš vhodné pro zamýšlený účel, zejména z hlediska komplikované identifikace parametrů, zdolouhavosti výpočtu a obtížné implementace do softwaru ferometru KF9a. Proto se tato práce orientovala na jednodušší třídu modelů, tzv. analytické modely hysterese, které řeší vztah mezi B a H pomocí analytických funkcí bez diferenciálních rovnic.

Výsledkem práce jsou tři modely: modifikovaný hyperbolický Takácsův model, rozšířený pro potřeby střídavého magnetování o novou, tzv. eliptickou funkci, a dva vlastní původní analytické modely hysterese – přímý analytický model a inverzní analytický model. Všechny tři vytvořené analytické modely jsou založeny na čistě matematickém přístupu, bez ohledu na fyzikální podstatu magnetizačních procesů. Jejich řešení spočívá v superpozici dynamické hysterese smyčky za pomoci tří až čtyř relativně jednoduchých matematických funkcí.

První dva navržené modely jsou přímé a modelují závislost $B = f(H)$, třetí model řeší inverzní závislost $H = f(B)$. Fyzikální procesy, spojené se střídavým magnetováním, jsou v navrhovaných modelech zahrnuty nepřímou, prostřednictvím parametrů. Tyto parametry nejsou konstantní, nýbrž mají charakter proměnných, závislých na amplitudě budicího signálu a na jeho frekvenci. Z tohoto důvodu se ve všech třech případech jedná o modely s flexibilními parametry.

Tvorba modelů vychází z naměřených bodů reálných hysterese smyček. V první fázi modelování byly zjištěny lokální parametry modelu – vždy pro jednu konkrétní amplitudu budicího signálu a jednu určitou frekvenci. Optimální parametry lokálního modelu byly hledány za pomoci genetického algoritmu s použitím věrohodného počátečního odhadu. Pro stanovení počátečního odhadu byla vytvořena čtyři uživatelská rozhraní v programu MATLAB. Následně byl využit existující optimalizační nástroj Genetic Algorithm Tool v MATLABu, pro který byla naprogramována ke každému z navržených modelů účelová funkce.

Po provedené optimalizaci parametrů byly sledovány zákonitosti jejich chování v závislosti na amplitudě budicího signálu resp. na frekvenci a jejich průběhy byly proloženy aproximačními funkcemi. Jako aproximační funkce se osvědčily zejména polynomy a racionální lomené funkce. Ke zjištění typu

vhodné aproximační funkce a pro stanovení jejich koeficientů byl použit nástroj MATLABu Curve Fitting Tool. Dosazením aproximovaných parametrů se dospěje ke konečnému modelu.

Ověřování kvality simulace a porovnání vlastností modelů

Ověřování kvality simulace probíhalo několika způsoby. Především byla vyhodnocena střední kvadratická odchylka $RMSD$ i relativní odchylky δ_{RMSD} mezi tvarem naměřených a simulovaných hysterezních smyček. Dále byla zjištěna relativní odchylka odhadu měrných ztrát δ_p , a konečně relativní odchylka δ_{B_a} resp. δ_{H_a} mezi simulovanými a reálnými hodnotami B_a (přímé modely) resp. H_a (inverzní model). Navržené modely byly posouzeny z hlediska odchylek mezi lokálním modelem a naměřenými daty i vzhledem k odchylce konečného modelu od naměřených průběhů vlivem aproximace parametrů. K vzájemnému porovnání modelů mezi sebou se lépe hodí relativní odchylky δ_{RMSD} , δ_p a δ_{B_a} resp. δ_{H_a} .

Co se týká lokálních modelů, dosahuje hyperbolický model odchylek $\delta_{RMSD} = 9\%$, $\delta_p = 6\%$ a $\delta_{B_a} = 4\%$. Záleží však přitom na typu materiálu a na tvaru simulovaných smyček. Se simulací materiálu Fe-Ni a s amorfním materiálem nemá model potíže (všechny odchylky do 5.5 %). Při problémech s Barkhausenovou nestabilitou [5] u materiálu Eo 10 však dosahuje odchylka $\delta_{RMSD} = 14\%$.

U přímého analytického modelu jsou odchylky větší: $\delta_{RMSD} = 12\%$, $\delta_p = 12\%$ a $\delta_{B_a} = 6\%$. Nejnáročnější je opět simulace materiálu Eo 10, kde v nejméně příznivých případech model vůbec nevystihne tvar smyčky a δ_{RMSD} vzrůstá až na 25 %. Při simulaci Fe-Ni a amorfního materiálu činí odchylky nejvýše 6 %, s výjimkou $\delta_p = 12\%$.

Odchylky pro inverzní analytický model jsou $\delta_{RMSD} = 13\%$, $\delta_p = 14\%$ a $\delta_{H_a} = 10\%$. To jsou ovšem opět odchylky pro nejobtížněji simulovatelný materiál Eo 10, při modelování Fe-Ni a amorfního materiálu jsou pozorované odchylky nejvýše 3 %, s výjimkou $\delta_p = 7\%$.

Pokud jde o modely s aproximovanými parametry, je jejich přesnost samozřejmě nižší v porovnání s lokálními, neboť po provedené aproximaci matematickými funkcemi již nemají parametry optimální hodnoty. Proto zde hyperbolický model (se třemi hyperbolickými složkami) dosahuje odchylek $\delta_{RMSD} = 28\%$, $\delta_p = 7\%$, $\delta_{B_a} = 8\%$, hyperbolický model (se dvěma hyperbolickými složkami) odchylek $\delta_{RMSD} = 8\%$, $\delta_p = 16\%$, $\delta_{B_a} = 11\%$, přímý analytický model odchylek $\delta_{RMSD} = 19\%$, $\delta_p = 15\%$, $\delta_{B_a} = 10\%$ a inverzní analytický model odchylek $\delta_{RMSD} = 20\%$, $\delta_p = 16\%$ a $\delta_{H_a} = 14\%$.

Z hlediska věrohodné simulace tvarů hysterezních smyček se jako nejuniversálnější ukázal modifikovaný Takácsův model, zejména jeho

varianta se třemi hyperbolickými složkami. Z důvodu velkého počtu parametrů (11) byla však tato možnost využita jen při modelování elektrotechnických Si plechů. Při modelování vzorků Fe-Ni a amorfního materiálu postačovaly dvě hyperbolické složky.

Přímý analytický model v porovnání s hyperbolickým nezachovává tvar hysterezních smyček tak věrně, což je patrné při vizuálním porovnání s naměřenými průběhy, a při modelování materiálů Fe-Ni a amorfního materiálu se u něj projevuje přehnaná strmost simulované smyčky. Strmosti smyček se vyznačuje také inverzní model, který má navíc potíže se simulací elektrotechnických Si plechů na vyšších frekvencích (200 Hz, 400 Hz).

Až na tyto nedostatky všechny tři vytvořené analytické modely dokáží vystihnout tvary dynamických hysterezních smyček v rozsahu použitých amplitud buzení a frekvencí. Jsou použitelné pro všechny tři typy testovaných materiálů.

Modely jsou připraveny ve formě, vhodné pro implementaci do měřicího programu kompenzačního ferometru KF9a.

Uplatní se zejména při měřeních, která vyžadují přesné nastavení pracovního bodu na požadovanou hodnotu H_a resp. B_a . Zvláště jde o silně nelineární amplitudovou magnetovací charakteristiku $B_a = f(H_a)$, pro kterou se hodí modifikovaný hyperbolický model a přímý analytický model. Použitím modelů lze urychlit proces přibližování k pracovnímu bodu směrem „shora“, zpřesnit odhad jeho polohy a tím výrazně zkrátit iterační proces. Zrychlení algoritmu je v současné době součástí dalšího výzkumu v souvislosti s aplikacemi různých numerických metod a nelineárních transformací.

5 ZÁVĚR

Naplnění cílů disertační práce

Hlavním cílem práce bylo vytvoření nových analytických modelů hystereze, vhodných pro střídavé magnetování, a jejich ověření pro tři hlavní skupiny magneticky měkkých materiálů.

Nejdůležitějším požadavkem na modely byla jejich jednoduchost, snadná implementovatelnost pro potřeby ferometru KF9a a použitelnost pro běžný rozsah amplitud budicího signálu a frekvencí jak v běžném (přímém), tak v inverzním režimu.

Hlavní cíl práce byl naplněn realizací tří modelů. Jde o *modifikovaný hyperbolický model*, kdy existující hyperbolický Takácsův model byl upraven přidáním tzv. eliptické složky, a o dva vlastní původní modely: *přímý analytický model* a *inverzní analytický model*.

Všechny modely jsou založeny na modelování hysterezních smyček s pomocí relativně *jednoduchých analytických funkcí*, bez diferenciálních rovnic. Hyperbolický Takácsův model obsahuje 8 resp. 11 parametrů (podle počtu hyperbolických složek). Přímý analytický model má maximálně 9 parametrů, jejich počet lze při zjednodušené definici složek modelu snížit až na 7. Inverzní analytický model zahrnuje 6 parametrů. Poměrně vysoký počet parametrů je cenou za snahu o co největší přesnost modelů.

Nalezení optimálních parametrů bylo uskutečněno po nalezení prvotního odhadu (za pomoci zvláště k tomu účelu vytvořeného uživatelského rozhraní) prostřednictvím optimalizačních nástrojů programu MATLAB. Potvrdil se předpoklad, že parametry jsou závislé na amplitudě B_a a na frekvenci f .

Podobnost chování parametrů v rámci téže třídy materiálů byla ověřena a potvrzena při simulaci dvou různých materiálů typu Fe-Ni.

Aproximace hodnot parametrů funkcemi byla provedena a ověřena ve směru jejich závislosti na amplitudě B_a , kterou lze na kompenzačním ferometru KF9a nastavovat prakticky spojitě. Při aproximaci se osvědčily polynomy a racionální lomené funkce. Vzhledem k tomu, že ferometr KF9a provádí měření na omezeném počtu frekvencí, lze ve směru frekvenční závislosti použít přímo nalezené lokální parametry, příp. lineární interpolaci.

Modely byly vyzkoušeny při simulaci tří různých typů reálných materiálů. Šlo o elektrotechnický plech s vysokým obsahem Si, o materiál typu Fe-Ni a o amorfní materiál s vysokým obsahem Co. Všechna potřebná měření byla prováděna na otevřených tabulových a páskových vzorcích měřených pomocí kompenzačního ferometru KF9a při sinusovém buzení.

Vlastnosti modelů byly otestovány pro všechny tři třídy simulovaných materiálů. Byla použita různá hlediska: přesnost simulace tvaru hysterezní smyčky, přesnost odhadu měrných ztrát p a přesnost odhadu amplitudy B_a resp. H_a (u inverzního modelu).

Modely v navržené podobě mají *formu vhodnou pro implementaci* do měřicího programu kompenzačního ferometru KF9a. Jsou *použitelné* pro běžný rozsah amplitud budicího signálu a frekvencí jak v běžném *přímém režimu* (modifikovaný hyperbolický model, přímý analytický model), tak v *inverzním režimu* (inverzní analytický model).

Z výše uvedeného vyplývá, že hlavní cíl disertační práce i jednotlivé dílčí cíle se podařilo splnit.

Směry pro další práci

Je třeba zdůraznit, že v rámci této práce byla sledována závislost navržených modelů pouze na dvou nejdůležitějších parametrech budicího signálu – na amplitudě B_a a na frekvenci f . U budicího signálu byl

prostřednictvím korekce zajištěn jeho sinusový průběh, a jiné vlivy nebyly uvažovány.

Uvažování závislosti vytvořených modelů na dvou proměnných je ve skutečnosti zjednodušením, neboť vlastnosti materiálu (a tedy i tvar hysterezní smyčky a materiálové parametry, které jsou s ní spojeny) jsou závislé na dalších fyzikálních veličinách, např. na teplotě a mechanickém namáhání, hlavně však na tvaru budicího signálu. Přitom experimenty s tvarem budicího signálu lze na použitém kompenzačním ferometru KF9a snadno realizovat. Je možno měřit při nesinusových tvarech magnetického toku, který odpovídá průběhu budicího napětí ve tvaru trojúhelníkovém, pilovém i obdélníkovém. Proto bych bylo vhodné se při další práci zaměřit právě tímto směrem.

Seznam v tezích použité literatury

- [1] ZEMÁNEK, I. *Selected Problems of the Open Specimen Measurements of Soft Magnetic Materials Parameters at AC Magnetization*. [Profesorská přednáška.] Praha: Vydavatelství ČVUT, 2009. 57 str. ISBN 978-80-01-04448-3.
- [2] IVÁNYI, A. *Hysteresis Models in Electromagnetic Computation*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1997.
- [3] TAKÁCS, J. *Mathematics of Hysteretic Phenomena*. Berlin: Wiley-VCH, 2003.
- [4] TAKÁCS, J. A Phenomenological Mathematical Model of Hysteresis. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 20, 2001, pp. 1002-1014.
- [5] TAKÁCS, J. Barkhausen instability and its implication in T(x) modelling of hysteresis. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 24, No. 4, 2004, pp. 1180-1190.
- [6] MAYERGOYZ, I.D. *Mathematical Models of Hysteresis*. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [7] DRAXLER, K. – KAŠPAR, P. – RIPKA, P. *Magnetické prvky a měření*. 2. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. 276 str. ISBN 80-01-01909-8.

- [8] ZEMÁNEK, I. – HAVLÍČEK, V. – HAVRÁNEK, A. Sensor of Magnetic Flux Density Waveform Distortion. In *EMSA 2012: 9th European Magnetic Sensors & Actuators Conference. Book of Abstracts*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2012, p. 137. ISBN 978-80-01-05078-1.
- [9] *Orientovaný transformátorový pás*. Válcovny plechu Frýdek-Místek, 1979.
- [10] ZEMÁNEK, I. *Výzkumná zpráva o měření magnetických parametrů materiálů FeNi42 – č. t. 3986, a FeNi47Cu5 – č. t. 3990, vyrobených v a.s. Kovohtě Rokycany*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra teorie obvodů, 2012.
- [11] *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox for Use with MATLAB®. User's Guide*. Version 1. [Uživatelská příručka je dostupná z programu MATLAB, v. 2007b]. [Manual gads_tb.pdf].
- [12] VARGA, L.K. – KOVÁCS, Gy. – TAKÁCS, J. Modeling the overlapping, simultaneous magnetization processes in ultrasoft nanocrystalline alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, 2008, pp. L26-L29.
- [13] TAKÁCS, J. – MÉSZÁROS, I. Separation of magnetic phases in alloys. *Physica B*, Vol. 43, 2008, pp. 3137-3140.
- [14] TAKÁCS, J. – KOVÁCS, Gy. – VARGA, L.K. Decomposition of the hysteresis loops of nanocrystalline alloys below and above the decoupling temperature. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, 2008, pp. e1016-e1019.

Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

Publikace v impaktovaných časopisech

- NOVÁ, I. – ZEMÁNEK, I.: Analytical inverse model with flexible parameters for dynamic hysteresis loops modelling. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011, vol. 87, no. 9b, p. 89-92. ISSN 0033-2097. **IF 0.242** (50 %)
- NOVÁ, I. – ZEMÁNEK, I.: Analytical model with flexible parameters for dynamic hysteresis loops modelling. *Journal of Electrical Engineering*. 2010, vol. 61, no. 7/s, p. 46-49. ISSN 1335-3632. **IF 0.278** (50 %)

Publikace v recenzovaných časopisech

Patenty

Publikace excerptované WoS

NOVÁ, I. – ZEMÁNEK, I.: Analytical inverse model with flexible parameters for dynamic hysteresis loops modelling. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011, vol. 87, no. 9b, p. 89-92. ISSN 0033-2097.

Seznam ostatních publikací

NOVÁ, I. – HAVLÍČEK, V. – ZEMÁNEK, I.: Dynamic Hysteresis Loops Modelling by Means of Extended Hyperbolic Model. In *EMSA 2012: 9th European Magnetic Sensors & Actuators Conference. Book of Abstracts*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2012, p. 138. ISBN 978-80-01-05078-1. (45 %)

NOVÁ, I.: Modelování hystereze magneticky měkkých materiálů pomocí analytických funkcí. In *Letní doktorandské dny 2012. Sborník příspěvků*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2012, p. 5-9. ISBN 978-80-01-05050-7. (100 %)

NOVÁ, I.: Extension of the Hyperbolic Model for Dynamic Hysteresis Loops Modelling. In *POSTER 2012 - 16th International Student Conference on Electrical Engineering* [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2012. (100 %)

NOVÁ, I. – ZEMÁNEK, I.: Analytical Extension of the Takács Model for Dynamic Hysteresis Loops Modelling. In *SMM 20 - 20th International Conference on Soft Magnetic Materials - Abstract Book and Conference Program*. Athens: National Technical University, 2011, p. 432. ISBN 978-960-9534-14-7. (50 %)

NOVÁ, I. – ZEMÁNEK, I.: Analytical inverse model with flexible parameters for dynamic hysteresis loops modelling. In *11th International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing*. Oita: Oita University, 2010, p. 17. (50 %)

NOVÁ, I. – ZEMÁNEK, I.: Analytical model with flexible parameters for dynamic hysteresis loops modelling. In *Magnetic Measurements 2010*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2010, p. 94. ISBN 978-80-01-04616-6. (50 %)

NOVÁ, I. – ZEMÁNEK, I.: Application of Takacs model to dynamic hysteresis loops of amorphous and classic magnetic materials. In *SMM 19 - Book of Abstracts*. Torino: INRiM, 2009, p. B2-13. (50 %)

ZEMÁNEK, I. – NOVÁ, I.: Compensation ferrometer KF9a – universal single sheet/strip and on-line tester for laboratory and industrial use. In *Proceedings of WMM'08*. Ghent, 2008, p. 413-429. (10 %)

Seznam ostatních publikací

Publikace v impaktovaných časopisech

Publikace v recenzovaných časopisech

Patenty

Publikace excerpované WoS

Publikace ostatní

ŠŤASTNÝ, J. – TŘEŠTÍK, B. – NOVÁK, F. – HAVLÍČEK, R. – NOVÁ, I.: *Manuál technické dokumentace*. České Budějovice: Kopp, 2009. 389 s. ISBN 978-80-7232-352-4. (20 %)

ŠŤASTNÝ, J. – TŘEŠTÍK, B. – KLEPŠ, Z. – NOVÁ, I.: *Manuál technické dokumentace*. České Budějovice: Kopp, 2004. ISBN 80-7232-223-0. (25 %)

VÍTOVEC, J. – NOVÁ, I.: Ověřování stacionarity a normality náhodných signálů. In: *Sborník referátů 10. konference EMISCON*. Smolenice, 1991. (50 %)

Bez ohlasů a recenzí

SUMMARY

The main topic of this doctoral thesis is suggestion of new mathematical models of hysteresis. Proposed models should be suitable for automatic measurement of soft magnetic materials by means of the compensation ferrometer KF9a.

Present differential or Preisach models are rather complicated and time-consuming for this purpose. Therefore more simple models were searched from the class of analytical models of hysteresis. The existing hyperbolic model was extended, adding a new component, and two original analytical models were created – direct analytical model and inverse analytical model.

All the three models are based on pure mathematical approach and consist in the construction of the dynamic hysteresis loop from three or four simple analytical functions. Physical processes related to AC magnetizing are involved indirectly – in the parameters values. They are variables depending on the excitation signal amplitude B_a and frequency f .

The construction of each model started with the decomposition of real hysteresis loops. At first, measured loops were simulated separately; favourable parameters were estimated and then optimized. The behaviour of the parameters was studied and their dependences were approximated. The approximated parameters were then substituted to the final model.

The applicability of proposed models and their limits were verified for three different types of soft magnetic materials at sinusoidal excitation. Models were tested with regard to the loop shape, to specific power losses and to the accuracy of B_a estimation.

Proposed models are prepared for implementation to the measuring program of the compensation ferrometer KF9a. They may be useful especially if exact working point at the strong non-linear amplitude magnetization characteristic is needed. Using the models, the approach to required point will be more quick and exact and therefore the iteration process could be accelerated.

This work only takes into account two most important characteristics of the input signal – B_a and f , using sinusoidal excitation. Other conditions were not considered. In fact, many other influences are present – temperature, mechanical stress and especially (non-sinusoidal) shape of the excitation signal. In future work, the loop shape and related parameters should be studied with regard to the excitation signal shape.

RESUMÉ

Předkládaná práce se zabývá návrhem nových matematických modelů hystereze, využitelných při automatizovaném měření otevřených vzorků magneticky měkkých materiálů na kompenzačním ferometru KF9a.

Stávající diferenciální resp. Preisachovy modely hystereze se nejeví pro tento účel příliš vhodné. Proto byly hledány jednodušší modely z třídy tzv. analytických modelů hystereze, což vyústilo v návrh modelů vlastních. Výsledkem je rozšíření hyperbolického Takácsova modelu o novou složku, a návrh dvou nových původních modelů – přímého analytického modelu a inverzního analytického modelu s flexibilními parametry.

Všechny tři vytvořené modely jsou založeny na čistě matematickém přístupu. Jejich podstata spočívá v konstrukci dynamické smyčky superpozicí ze tří až čtyř jednoduchých analytických funkcí, bez diferenciálních rovnic. Fyzikální procesy, spojené se střídavým magnetováním, jsou ve všech modelech zahrnuty nepřímou, prostřednictvím parametrů. Ty mají charakter proměnných, závislých na amplitudě budicího signálu B_a a jeho frekvenci f .

Tvorba modelů vychází z dekompozice průběhů reálných hysterezních smyček. Po prvotním odhadu parametrů a následné optimalizaci byly prostudovány zákonitosti chování parametrů v závislosti na B_a a f , a ověřeny možnosti aproximace průběhu těchto parametrů funkcemi. Dosazením aproximovaných hodnot parametrů se dospělo ke konečnému modelu.

Modely byly ověřeny při simulaci tří různých typů reálných materiálů. Všechna potřebná měření byla prováděna na otevřených vzorcích za pomoci kompenzačního ferometru KF9a při harmonickém buzení. Modely byly testovány ze tří různých hledisek – dodržení tvaru smyčky, odhad měrných ztrát a přesnost odhadu B_a (resp. H_a pro inverzní model). Všechny modely jsou použitelné pro všechny tři typy testovaných materiálů.

Navržené modely jsou připraveny ve formě, vhodné pro implementaci do měřicího programu kompenzačního ferometru KF9a. Uplatní se zejména při měřeních, vyžadujících přesné nastavení pracovního bodu na silně nelineární amplitudové magnetovací charakteristice $B_a = f(H_a)$. Použitím modelů lze urychlit proces přibližování k požadovanému pracovnímu bodu, zpřesnit odhad jeho polohy a tím výrazně zkrátit iterační proces.

V práci byla sledována závislost modelů pouze na dvou nejdůležitějších parametrech budicího signálu – na amplitudě B_a a frekvenci f , přičemž bylo zajištěno harmonické buzení, a jiné vlivy nebyly uvažovány. Tvar hysterezní smyčky a parametry s ní spojené jsou ve skutečnosti závislé na dalších okolnostech, např. na teplotě a mechanickém namáhání, hlavně však na tvaru budicího signálu. Proto by bylo vhodné zaměřit se v budoucnu tímto směrem.