

THE SIMULATION OF MAGNETIC HYSTERESIS LOOP FOR FERROMAGNETIC MATERIALS

Vít Smejkal

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xsmej03@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Zdeněk Roubal

E-mail: roubalz@feec.vutbr.cz

Abstract: This paper deals with the simulation of magnetic hysteresis. In the beginning the basic formulas of the Jiles's model are mentioned. The model was implemented in the *Matlab* environment. Then there is discussed which ferromagnetic material will be used. The model parameters were optimized by fitting measured curves of sample core. The modeling of hysteresis can be used in a transformer design to calculate core losses.

Keywords: Jiles-Atherton hysteresis model, Langevin's function, nanocrystalline core

1. ÚVOD

Tato práce se věnuje simulaci hystereze feromagnetika. Cílem je vytvořit model, který bude schopen simulovat s dobrou přesností hysterezi tak, aby ji bylo možné použít k výpočtu ztrát v mag. obvodu a to v závislosti na velikosti pracovního rozkmitu magnetické indukce ΔB . Požadavkem také je, aby model dokázal dobře simulovat unipolární buzení magnetického obvodu, např. v aplikaci jednočinného propustného měniče. Pro vybraný perspektivní materiál pro magnetický obvod byl připraven vzorek pro měření. Vlastnosti tohoto materiálu byly změřeny a vytvořen model pro simulaci hystereze.

2. MODEL HYSTEREZE

Pokud by existoval přesný model chování magnetického jádra, umožnilo by to jeho optimální využití vzhledem k volbě rozkmitu pracovní indukce a celkových ztrát v jádře. Pro simulaci hystereze byl zvolen model Jilesův-Athertonův model [1] [2], který je založen na popisu chování feromagnetika na úrovni domén.

Výchozí rovnicí je diferenciální popis, který mění výstup podle změny směru vstupní veličiny, kterou je intenzita mag. pole. Celková magnetizace M je pak dána součtem dvou složek: M_{irr} je nevratná (irreversible) magnetizace a M_{rev} je vratná (reversible) magnetizace. Při změně magnetizace dochází k nevratným posuvům, které jsou definovány podle [2] vztahem

$$\frac{dM_{\text{irr}}}{dH} = \frac{M_{\text{an}} - M_{\text{irr}}}{k \cdot \delta - \alpha(M_{\text{an}} - M_{\text{irr}})} \quad [-; \text{A/m, A/m; A/m, -, -, A/m, A/m}]. \quad (1)$$

Ve vztahu (1) je M_{an} bezztrátová (anhysteretic) a M_{irr} nevratná magnetizace, k parametr určující rozšíření křivky (tedy hysterezní ztráty), δ znaménkový parametr (pro rostoucí H je rovno 1, pro klesající -1) a α je parametr molekulárního pole [3].

Bezeztrátová magnetizace je idealizovaný proces, při kterém během magnetizace nedochází k poruchám v krystalové mřížce (způsobují ztráty). Její průběh je tak dán posuvem doménových stěn a natáčením spontánní magnetizace těchto domén do směru vnějšího pole. Tato závislost je nejčastěji uváděna Langevinovou funkcí:

$$M_{\text{an}} = M_{\text{sat}} \cdot \left[\coth\left(\frac{H + \alpha \cdot M}{a}\right) - \frac{a}{H + \alpha \cdot M} \right] [\text{A/m}; \text{A/m}; \text{A/m}], \quad (2)$$

kde M_{sat} je magnetizace saturační (charakteristická pro každý materiál, závislá na teplotě), a tvarový, teplotně závislý parametr a celková intenzita mag. pole je dána součtem vnějšího pole H a vnitřního (Weissova) pole, které je α -násobkem magnetizace M . Jak je uvedeno v [3], tato rovnice byla odvozena pro paramagnetické materiály, a proto neaproximuje průběh vždy zcela přesně; někdy se proto používá přímo naměřená křivka.

Poslední částí vztahu je vratná magnetizace. Ta je vyjádřena v modelu jako rozdíl bezetrátové a nevratné magnetizace, který je zeslaben, tedy [2]

$$M_{\text{rev}} = c \cdot (M_{\text{an}} - M_{\text{irr}}) [\text{A/m}; -, \text{A/m}, \text{A/m}], \quad (3)$$

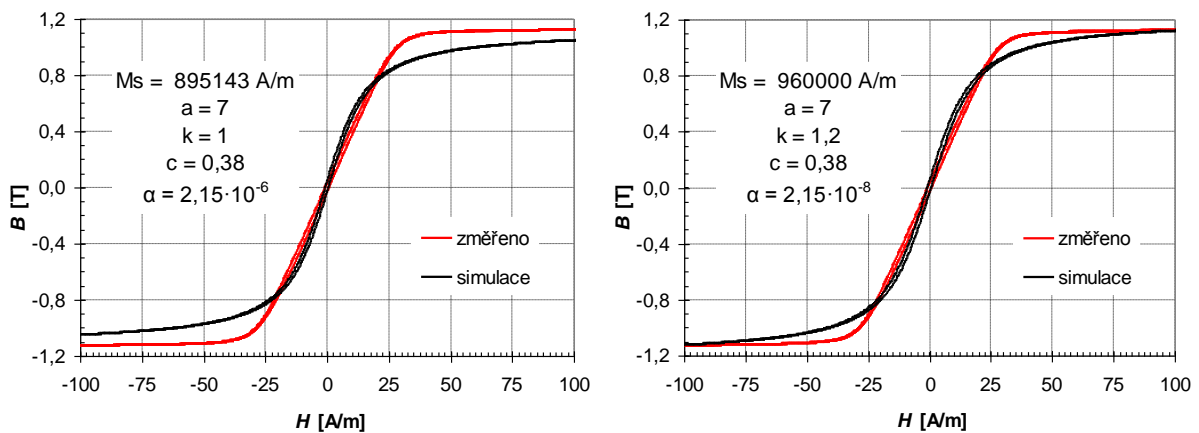
kde parametr c je z intervalu $0 < c < 1$. Výsledný vztah pro změnu magnetizace podle změny intenzity mag. pole je dán součtem vztahu (1) a derivace vztahu (3):

$$\frac{dM}{dH} = (1 - c) \cdot \frac{M_{\text{an}} - M_{\text{irr}}}{k \cdot \delta - \alpha(M_{\text{an}} - M_{\text{irr}})} + c \cdot \frac{dM_{\text{an}}}{dH} \quad (4)$$

Výpočet průběhu magnetizace M odpovídající vstupnímu průběhu intenzity mag. pole H se tedy provede obdobně jako v [1] následujícím postupem. Nejprve se určí hodnota bezetrátové magnetizace, např. podle (2). Dále se určí změna nevratné magnetizace (1). Nyní se vypočte vratná magnetizace (3) a následně výsledná změna magnetizace podle vztahu (4). Do něj však již byly předešlé hodnoty dosazeny, proto lze přímo provést výpočet. Nevýhodou je, že při použití vztahu (2) pro výpočet se musí použít iterační způsob, protože ve (2) se objevuje vypočítaná hodnota. Při výpočtu je třeba kontrolovat, zda nedošlo k tomu, že při zmenšování intenzity mag. pole z vrcholu křivky v prvním kvadrantu je vratná magnetizace (3) menší než magnetizace bezetrátová a obdobně ve třetím kvadrantu [2].

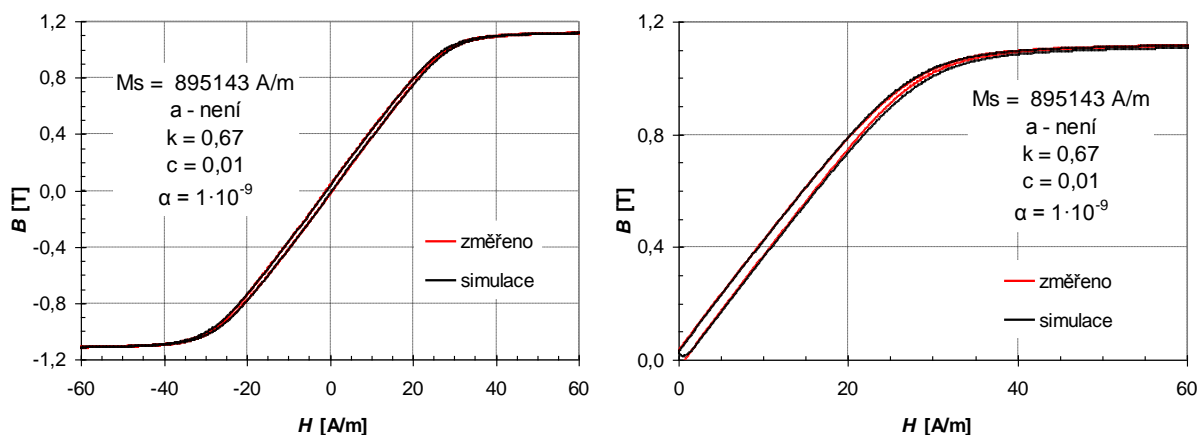
2.1. POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A SIMULOVANÝCH HODNOT

Pro ověření modelu byly změřeny v laboratoři magnetických měření UTEE magnetizační křivky pro nanokrystalický materiál Vitroperm 500F. Jeho výhodou je indukce nasycení přibližně 1,2 T, což je více než dvojnásobná hodnota oproti běžně používaným feritům (přibližně 0,5 T). Dále také umožňuje změnu tvaru hysterezní smyčky pouze technologickým zpracováním při výrobě; tím je umožněno získat plochý tvar hysterezní smyčky bez vložení vzduchové mezery. Naměřené křivky sloužily k nastavení parametrů (M_{sat} , c , a , k , α) výše popsaného modelu. Model s optimalizací parametrů metodou nejmenších čtverců byl implementován do prostředí *Matlab* ve formě skriptu.



Obrázek 1: Porovnání naměřené a simulované křivky s použitím Langevinovy funkce

Porovnání naměřené křivky se simulovanými při použití Langevinovy funkce (2) je na obrázku 1. Vlevo byla použita přibližná hodnota magnetizace nasycení určená měřením. Ve sledované oblasti rozkmitu intenzity magnetického pole ale simulovaná křivka nevystihuje chování v oblasti přechodu do saturace. Pokud se magnetizace nasycení zvětší, je možné dosáhnout lepšího průběhu – viz obrázek 1 vpravo. Nevýhodou je omezení rozkmitu intenzity magnetického pole – při jeho zvětšení magnetická indukce dále poroste, což je nežádoucí. I přes toto omezení nelze zaoblení v oblasti nasycení správně modelovat. Při použití změřené bezztrátové křivky (zjednodušeným způsobem - průměrováním křivky hysterezní) již model simuluje křivku s optimalizovanými parametry s dobrou přesností, což je vidět na obrázku 2 vlevo. V pravé části obrázku 2 je výsledek simulace pro unipolární buzení.



Obrázek 2: Simulace hysterezní smyčky při použití změřené bezztrátové křivky

3. ZÁVĚR

Základní model hystereze dokáže simulovat statickou křivku. V případě nanokrystalického materiálu se prokázalo jako přínosné použít naměřenou bezztrátovou křivku. Výhodou modelu je, že pro dané parametry dokáže simulovat průběh magnetické indukce pro zvolené buzení. Nevýhodou je, že si nelze přímo zvolit rozkmit pracovní indukce, ale pouze rozkmit intenzity mag. pole. Další práce se bude věnovat rozšíření modelu pro simulaci dynamické křivky postihující změnu (rozšíření) hysterezní smyčky v závislosti na kmitočtu. Tento model by mohl nahradit zjednodušené ztrátové křivky uváděné výrobcí mag. materiálů, které se používají při návrhu transformátoru.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vzniknul za podpory projektu CZ.1.07/2.3.00/20.0007 WICOMT, financovaného z operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.

REFERENCE

- [1] Patočka, M.: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd., Brno, VUTUM 2011, 564 s, ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] Jiles, D. C., Thoelke, J., Devine, M.: Numerical Determination of Hysteresis Parameters for the Modeling of Magnetic Properties Using the Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1992, Vol. 28, No. 1, s. 9.
- [3] Novák, M.: Přechodový děj při zapnutí transformátoru: Způsoby omezování zapínacího proudu. Liberec, 2003. Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/disertace_Miroslav_Novak.pdf. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.