

Vpliv višjih harmonskih komponent na magnetne lastnosti mehkomagnetnih materialov

Marko Petkovšek, Peter Zajec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana
E-pošta: marko.petkovsek@fe.uni-lj.si

Influence of Higher Harmonics on Magnetic Properties of Soft-Magnetic Material

Abstract. This paper highlights the area of magnetic properties measurement of soft-magnetic material at higher frequencies and the presence of higher harmonics. Although the measurement procedure is defined in international standards [1, 2] in order to be able to evaluate and compare measurement results on the producer and customer side, this only gives us information on magnetic properties at conditions that are actually far from conditions that a final product is normally exposed to. Namely, the measurement should be done in such a way, that either the magnetic flux density B in the core or the magnetic field strength H is sinusoidal. However, in real operation of a product, such conditions are extremely rare. So, it is of great importance to a design engineer to be able to measure the magnetic properties also at conditions that are expected for the normal operation of the product.

In the final part of the paper, experimental results are given for a soft-magnetic wound core that is firstly measured at frequencies of 50 Hz, 150 Hz and 250 Hz. Then, the magnetization was changed to include not only the fundamental (50 Hz) but also the third and the fifth harmonic. In this case, the BH hysteresis could change from a "conventional" form and could exhibit also several minor loops.

1 Uvod

V proizvodnem procesu je ena ključnih postavk izhodna ali končna kontrola kakovosti, s katero sebi in kupcu dokažemo skladnost izdelka z zastavljenimi kriteriji. Pri izdelavi jeder transformatorjev in dušilk ali pa lamel električnih strojev je med postopkom končne kontrole tako treba izvesti tudi meritev magnetnih lastnosti.

Seveda je edino smiselno, da so merilni postopki zaradi primerljivosti in ponovljivosti rezultatov standardizirani, kar velja tudi za merjenje magnetnih lastnosti mehkomagnetnih materialov. Žal pa je meritev magnetnih lastnosti končnega izdelka velikokrat nemogoče opraviti na način, ki bi ga vstopna surovina sicer dovoljevala. Elektro pločevino tako lahko pomerimo s pomočjo ustrezne merilne opreme (npr. Epstein frame, single sheet tester), a je merilni postopek vezan na uporabo vnaprej določene oblike (dimenzije) pločevine. Če je naš končni izdelek jedro transformatorja ali pa paket lamel rotorja ali statorja motorja, je seveda za meritev magnetnih lastnosti in

oceno ustreznosti proizvodnega postopka treba uporabiti drugačen pristop. V nadaljevanju bo na primeru toroidnih tračnih jeder na kratko pojasnjen princip merjenja magnetnih lastnosti, nakar bo sledil opis merilne naprave, s katero je mogoče pomeriti magnetne lastnosti jedra pri povišani frekvenci in prisotnosti višjih harmonskih komponent v magnetilnem toku, kar je za konstrukterja lahko zelo dobrodošel podatek.

2 Splošno o merilnem postopku

Meritev magnetnih lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder temelji na ti. transformatorskem principu, saj testno jedro (največkrat toroid) za potrebe meritev opremimo z dvema navitjema. S primernim magnetilnim tokom i_P skozi primarno navitje z N_P ovoji (slika 1) poskrbimo za magnetno poljsko jakost H , ki bo jedru povzročila določeno gostoto magnetnega pretoka B , na sekundarnem navitju z N_S ovoji pa lahko na ta način kot posledico spreminjajoče se gostote magnetnega pretoka B v jedru merimo inducirano napetost u_S .

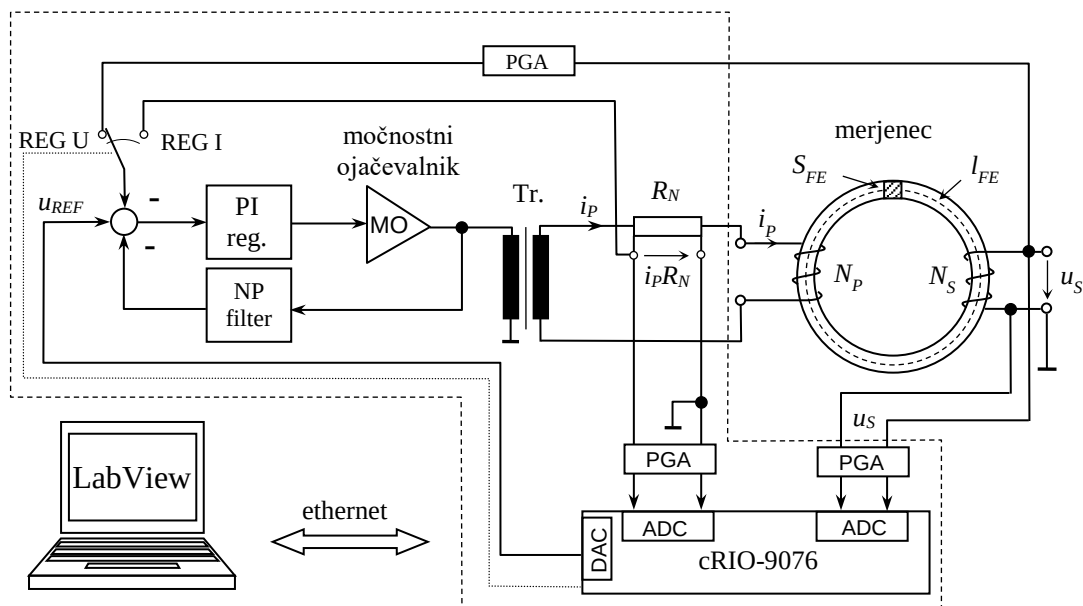
Merilni postopek je zaradi primerljivosti in ponovljivosti rezultatov meritev treba izvesti pri enakih pogojih – bodisi pri takem magnetilnem toku i_P in s tem magnetni poljski jakosti H , da je gostota magnetnega pretoka B in s tem inducirana napetost u_S sinusne oblike [1] (na sliki 1 označen preklopnik v položaju REG U – uporabljeno v prispevku), ali pa s sinusnim magnetilnim tokom i_P [2] (preklopnik v položaju REG I), ki v splošnem povzroči nesinusen potek gostote magnetnega pretoka B oz. napetosti u_S . V obeh primerih seveda velja, da je magnetna poljska jakost H prenosorazmerna primarnemu toku:

$$H(t) = \frac{i_P(t) \cdot N_P}{l_{FE}}, \quad (1)$$

pri čemer je N_P število primarnih ovojjev in l_{FE} srednja dolžina magnetnih silnic v jedru. Inducirana napetost na sekundarnem navitju pa je enaka:

$$u_S(t) = -N_S \cdot S_{FE} \frac{dB(t)}{dt}, \quad (2)$$

kjer je N_S število sekundarnih ovojjev in S_{FE} presek jedra. Iz slednjega zapisa tudi sledi, da v mikrokrmilniku lahko izračunamo referenčni signal u_{REF} glede na želeni časovni potek in velikost (temensko vrednost) gostote magnetnega pretoka.



Slika 1: Shema merilnega sistema z možnostjo izbire načina vzbujanja.

S takim merilnim sistemom (več o njem v [3]) je poleg osnovnih parametrov, kot je npr. efektivna vrednost magnetne poljske jakosti H_{ef} ali pa relativna permeabilnost μ_r pri določeni gostoti magnetnega pretoka B , mogoče prikazati tudi časovni potek obeh veličin (H in B), ki v xy prikazu tvorita za uporabnika še bolj zanimivo BH histerezno zanko in dobiti podatek o delovni specifični izgubni moči p_s (v W/kg). Slednja združuje specifične histerezne izgube p_h in specifične izgube zaradi vrtničnih tokov p_e . Obe komponenti sta odvisni tako od frekvence kot tudi od temenske vrednosti gostote magnetnega pretoka. V splošnem lahko po [4] zapišemo odvisnost skupnih specifičnih izgub kot:

$$p_s = p_h + p_e = c_1 \cdot B_m^x \cdot f + c_2 \cdot B_m^y \cdot f^2, \quad (3)$$

pri čemer sta c_1 in c_2 koeficienta izgub, x in y pa eksponenta, ki zavzemata vrednosti med 1 in 3, večinoma okrog 2.

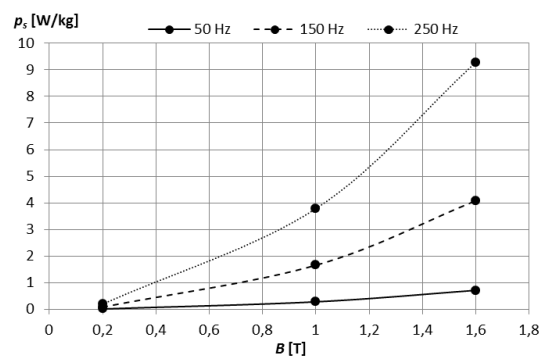
3 Rezultati

V nadaljevanju so podani rezultati meritev magnetnih lastnosti za toroidno tračno jedro s tipsko oznako 53/39/27 (zunanji in notranji premer ter višina jedra v mm). Najprej je bilo jedro magneteno s takim izmeničnim tokom, da je bila v jedru dosežena sinusna gostota magnetnega pretoka s temensko vrednostjo $B_m = 1,6$ T, nakar smo stopnjo magnetenja postopoma znižali na 1,0 T in 0,2 T. Frekvenca vzbujalnega toka pri tem je bila: 50 Hz, 150 Hz in 250 Hz. V tabeli 1 so za uporabljeni nabor frekvenc in gostot magnetnega pretoka podane izmerjene efektivne vrednosti magnetne poljske jakosti in relativne permeabilnosti μ_r . Poleg tega je med meritvijo bila pomerjena tudi specifična izgubna moč p_s . Njen potek v odvisnosti gostote magnetnega pretoka je podan na sliki 2.

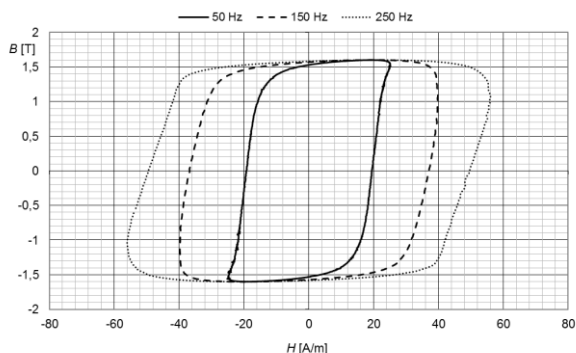
Razvidno je, da v skladu s (3) z zvišanjem frekvence vzbujalnega toka zelo povečamo izgubno moč v jedru. Omenjeno dejstvo je zelo nazorno razvidno tudi s slike 3, saj postaja histerezna zanka s povečevanjem frekvence vedno širša.

Tabela 1. Merilni rezultati za vzorec pri različnih stopnjah magnetenja in različnih frekvencah vzbujalnega toka

f [Hz]	B_m [T]	H_{ef} [A/m]	μ_r /	p_s [W/kg]
50	1,600	18,68	51585	0,713
	0,999	11,86	49900	0,281
	0,199	3,35	33678	0,012
150	1,601	33,12	31905	4,081
	1,000	21,55	27578	1,657
	0,200	5,91	19318	0,082
250	1,600	44,98	22702	9,290
	1,001	29,12	20609	3,784
	0,201	7,99	14549	0,195



Slika 2. Delovna specifična izgubna moč pri različnih frekvencah vzbujalnega toka v odvisnosti od gostote magnetnega pretoka



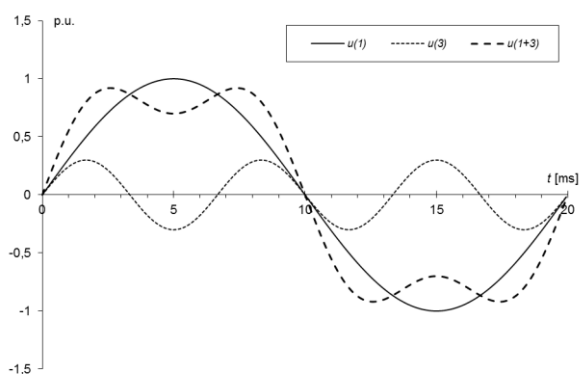
Slika 3: Družina histereznih zank pri $B_{zel} = 1,6$ T in različnih frekvencah vzbujačnega toka

Nato je bilo magnetenje jedra spremenjeno v skladu s prej predstavljenim principom, in sicer: v jedru smo želeli vzpostaviti zahtevano temensko vrednost gostote magnetnega pretoka ($B_{zel} = 1,6$ T), le da je sedaj poleg osnovne harmonske komponente k skupnemu rezultatu prispevala še tretja ali peta harmonska komponenta. Časovni potek referenčne napetosti je za primer s prisotno tretjo harmonsko komponento (poleg osnovne frekvence 50 Hz) podan na sliki 4, s prisotno peto harmonsko komponento pa na sliki 5. Pri konstruiranju referenčnega signala za merilni sistem je bilo v obeh primerih (obakrat normirano; p.u.) predpostavljeno, da znaša amplituda tretje oz. pete harmonske komponente

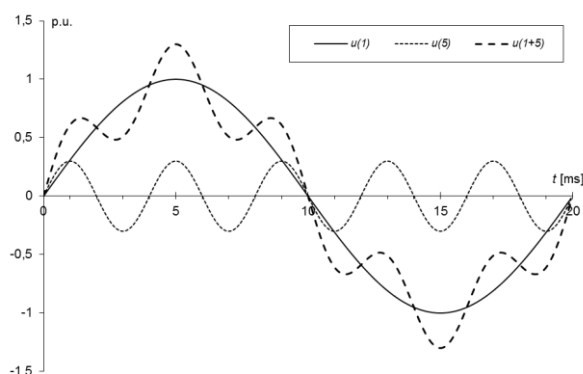
napetosti 30% vrednosti amplitude osnovne harmonske komponente, pri čemer je fazni kot med osnovno in tretjo harmonsko komponento enak 0° (sinhroniziran začetek prve in tretje harmonske komponente).

Kot zanimivost sta na slikah 6 in 7 podani še primerjavi med obliko časovnega poteka referenčne napetosti (črtkano) in »gostote magnetnega pretoka« (polna črta), ki naj bi tako napetost pravzaprav povzročila (ponovno p.u.). Upoštevajoč povratno zanko napetosti na sliki 1 je referenčna napetost pravzaprav enaka sekundarni inducirani napetosti, iz te pa z upoštevanjem (2) lahko izračunamo gostoto magnetnega pretoka. Referenčna napetost $u(1+3)$ (oz. $u(1+5)$) na slikah 4 in 5 je tako rezultat seštevanja osnovne harmonske komponente in tretje (pete) harmonske komponente z razmerjem amplitud 1:0,3, potek »gostote magnetnega pretoka« (B) pa je dobljen z integracijo poteka inducirane napetosti.

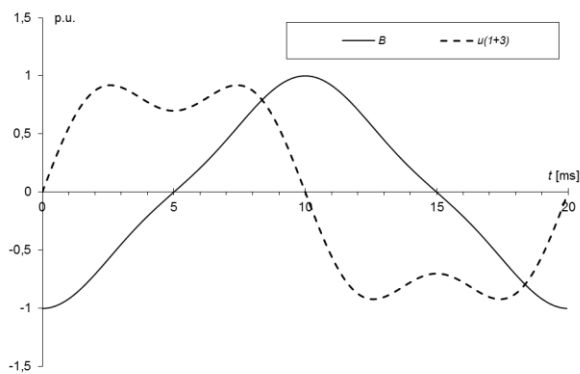
Na prvi pogled bi lahko podali oceno, da sta si časovna poteka gostote magnetnega pretoka na slikah 6 in 7 precej podobna. Fizikalno ali še boljše elektrotehniško gledano (navezujoč se na (2)!) bi zato morala tudi časovna odvoda obeh gostot magnetnega pretoka rezultirati v precej podobnih časovnih potekih inducirane napetosti. A temu ni tako, kar kaže na izredno občutljivost merilnega postopka, ki je vezan na merjenje napetosti in posledično računanje (integral!) gostote magnetnega pretoka.



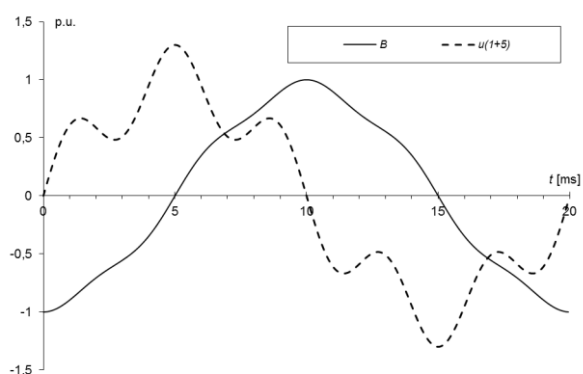
Slika 4: Oblika inducirane napetosti pri prisotni tretji harmonski komponenti



Slika 5: Oblika inducirane napetosti pri prisotni peti harmonski komponenti

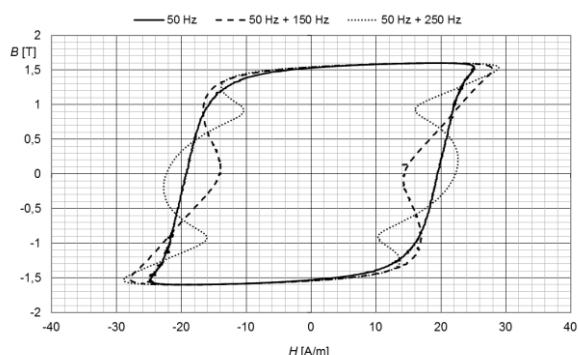


Slika 6: Gostota magnetnega pretoka in inducirana napetost pri prisotni tretji harmonski komponenti

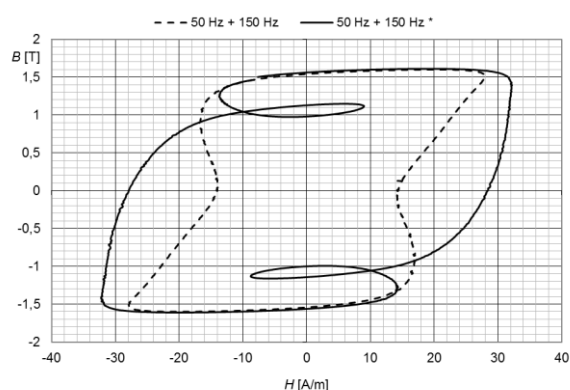


Slika 7: Gostota magnetnega pretoka in inducirana napetost pri prisotni peti harmonski komponenti

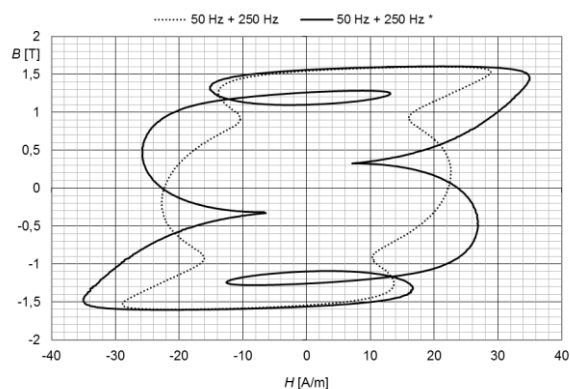
Na sliki 8 je podana družina histerezni zank za $B_{zel} = 1,6$ T pri 50 Hz in s prispevkom tretje oz. pete harmonske komponente, kot je prikazano na slikah 6 in 7, v tabeli 2 pa so zbrani ključni merilni rezultati. Zanimivo je, da so vrednosti tako H_{ef} kot tudi p_s ob prisotnosti tretje oz. pete harmonske komponente pravzaprav celo nižje kot v primeru samo osnovne komponente (tabela 1). Se pa rezultati precej spremenijo, če spremenimo obliko želene gostote B . V primeru na slikah 9 in 10 je razmerje amplitud harmonskih komponent (napetosti!) 1:1 (označeno z * oz. s polno črto), spremenjen pa je tudi fazni kot med komponentama. Ob spreminjanju faznega kota dosežeta H_{ef} in p_s do $\approx 30\%$ večje vrednosti kot prej.



Slika 8: Družina histerezni zank pri $B_{zel} = 1,6$ T in prisotni tretji in peti harmonski komponenti



Slika 9: Histerezni zanki pri $B_{zel} = 1,6$ T in prisotni tretji harmonski komponenti pri razmerju 1:0,3 in 1:1 (*)



Slika 10: Histerezni zanki pri $B_{zel} = 1,6$ T in prisotni peti harmonski komponenti pri razmerju 1:0,3 in 1:1 (*)

Tabela 2. Merilni rezultati za vzorec pri različnih stopnjah magnetenja in prisotni tretji in peti harmonski komponenti

f [Hz]	B_m [T]	H_{ef} [A/m]	μ_r /	p_s [W/kg]
50 + 150	1,600	18,48	45103	0,691
	1,000	11,47	48545	0,260
	0,199	3,13	32360	0,011
50 + 250	1,600	18,37	43844	0,707
	0,999	11,64	48114	0,271
	0,200	3,26	33326	0,012

V obeh primerih je opaziti, da se osnovna oblika histerezni zank spremeni do te mere, da se v njej lahko pojavijo tudi dodatne manjše zanke (minor loops [5, 6]). Oblika krivulje, pri kateri B vsebuje višje harmonske komponente (hkrati pa H ni sinusne oblike!), načeloma precej odstopa od »klasične« histerezne zanke. Pojav, lokacija in velikost manjših zank je (pri istem vzorcu!) odvisen od razmerja amplitud in faznega zamika med komponentama referenčnega napetostnega signala oz. med komponentama gostote magnetnega pretoka.

4 Zaključek

V prispevku je osvetljena tematika merjenja magnetnih lastnosti mehkomagnetnih materialov pri povišani frekvenci in prisotnosti višjih harmonskih komponent v gostoti magnetnega pretoka B . V tem primeru je bil merjeni vzorec toroidno tračno jedro, podobno meritev pa bi lahko opravili tudi za npr. statorski ali rotorski paket motorja, kjer je prisotnost višjih harmonskih komponent v gostoti magnetnega pretoka prej pravilo kot izjema. Iz rezultatov je razvidno, da se s povečanjem frekvence specifične izgube precej povečajo. V primeru, ko med meritvijo gostota magnetnega pretoka vsebuje tudi višje harmonske komponente (in H ni sinusne oblike!), moramo pričakovati, da bodo histerezne zanke odstopale od »klasične« oblike, prav tako pa je seveda za pričakovati spremenjeno (načeloma večjo) specifično izgubno moč.

Literatura

- [1] International standard IEC 404-2, "Methods of measurement of magnetic, electrical and physical properties of magnetic sheet and strip."
- [2] ASTM A772 A772M-00(2005) Standard Test Method for AC Magnetic Permeability of Materials Using Sinusoidal Current.
- [3] M. Petkovšek: Magnetne lastnosti tračnih jeder pri različnih načinih vzbujaanja, Elektrotehniški vestnik, 2016, letn. 83, št. 4.
- [4] R. Boll "Soft Magnetic Materials," *Vacuumschmelze GmbH*, Berlin.
- [5] N. Alatawneh and P. Pillay, "The Minor Hysteresis Loop Under Rotating Magnetic Fields in Machine Laminations," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 4, pp. 2544–2553, Jul./Aug. 2014.
- [6] T. Taitoda, Y. Takahashi and K. Fujiwara, "Iron Loss Estimation Method for a General Hysteresis Loop With Minor Loops," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 51, no. 11, November 2015.