

Vpliv mehanskih napetosti 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 a Mechanical Stress on Magnetic Properties of Soft-Magnetic Materials

Abstract. *This paper gives a deeper insight into magnetic properties of a soft-magnetic material that is exposed to a mechanical stress. Although soft-magnetic materials that are used as magnetic components in chokes, transformers or in rotating machines seem robust at first sight, this is far from the truth. Namely, as it is shown on a wound core example, either a short time or a continuous mechanical stress can significantly change the magnetic properties of the core. Therefore, in order to achieve the required properties of an assembled electromagnetic device, a proper handling is required throughout the whole process.*

1 Uvod

Končna kontrola je eno izmed ključnih področij v procesu proizvodnje mehkomagnetnih jeder iz transformatorske pločevine ali feritnega prahu. Poleg mehanske kontrole, kjer je treba preveriti dimenzijsko ustreznost in mehansko robustnost, je seveda za nadaljnjega uporabnika zanimiv predvsem podatek o magnetnih lastnostih. Te je v odvisnosti od vrste izdelka (npr. tračna/feritna jedra ali lamele statorskih in rotorskih paketov električnih rotacijskih strojev) mogoče dobiti z neposrednim ali posrednim merilnim postopkom, ki ju zaradi zagotavljanja sledljivosti in korektnega odnosa med poslovnima partnerjema izvajamo tako pri proizvajalcu kot pri kupcu.

Četudi so na prvi pogled izdelki iz tračnih mehkomagnetnih materialov za razliko od feritnih robustni in odporni na mehanske deformacije, temu v resnici ni tako. Prvotno odličen izdelek bo zaradi delovanja mehanske sile izkazoval bistveno spremenjene magnetne lastnosti [1, 2], kar se v prvi vrsti pokaže kot napačno ali neustrezno delovanje naprave, v katero je tak izdelek vgrajen, lahko pa je seveda tudi razlog za prekinitev pogodbe med poslovnima partnerjema. Mehanska sila, ki negativno vpliva na magnetne lastnosti materiala (gre za t.i. inverzno magnetostrikcijo oz. megnetoelastičnost – Villarijev pojav), je lahko posledica več dejavnikov. Najpogosteje je vzrok za prisotnost mehanskih napetosti v materialu neustrezen termični postopek po končanju vseh faz procesa, ki vključujejo mehansko preoblikovanje – npr. krivljenje pločevine, žaganje, brušenje, preoblikovanje v želeno obliko. Zato je

poznavanje »metalurških« lastnosti materialov ključnega pomena za izbiro ustreznega temperaturnega profila (in ustrezne nadzorovane atmosfere), s čimer je mogoče mehanske napetosti izničiti in s tem doseči optimalne magnetne lastnosti materiala.

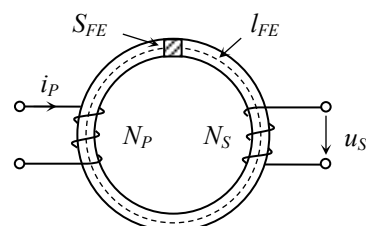
Poseben problem pri mehkomagnetnih materialih pa predstavlja neustrezno rokovanje po končani termični obdelavi in opravljenih kontrolnih meritvah magnetnih lastnosti, s katerimi smo sicer potrdili ustreznost izdelka. Magnetne lastnosti se namreč začasno ali celo trajno spremenijo, če je izdelek izpostavljen tako kratkotrajni (enkratni) mehanski obremenitvi – npr. zaradi padca z delovne mize ali neustreznega transporta, kot tudi trajni mehanski obremenitvi – npr. zaradi neustreznega pritrjevanja, neenakomernega ohlajanja zalivnega materiala transformatorskega jedra ali kot posledica namestitve navitij na jedro.

Namen tega prispevka je na primeru tračnih toroidnih jeder prikazati, kako in v kolikšni meri vplivajo mehanske obremenitve na nekatere ključne magnetne lastnosti materiala.

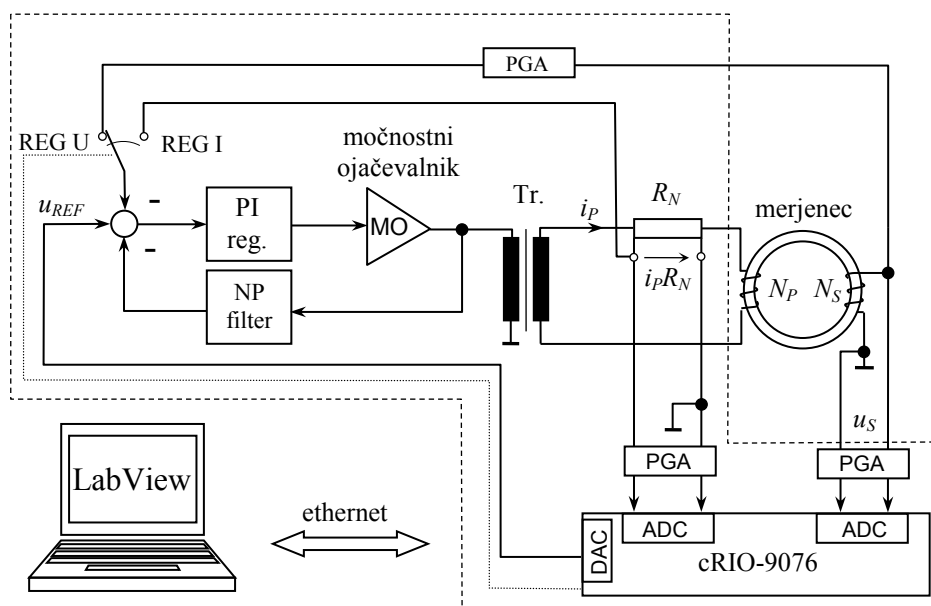
2 Osnovne značilnosti merilnega postopka

Magnetne lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder ugotavljamo s posrednim merilnim postopkom, pri katerem merjenec opremimo z dvema navitjema. S tokom i_p skozi primarno navitje z N_p ovoji (slika 1) poskrbimo za ustrezno magnetno poljsko jakost H , na sekundarnem navitju z N_s ovoji pa merimo inducirano napetost u_s kot posledico spreminjajoče se gostote magnetnega pretoka B v jedru.

Z željo po zagotavljanju primerljivosti meritev pri praktični izvedbi merilnega sistema ločimo dva pristopa [3], in sicer: a) vsiljeni primarni tok je sinusne oblike, posledično je inducirana napetost v splošnem nesinusna in b) primarni tok magneti jedro tako, da je inducirana napetost sinusne oblike. Na sliki 2 je podana blokovna shema merilnega sistema, ki je podrobneje opisan v [4, 5], in ki omogoča izvajanje meritev na oba predstavljeni načini ter nam bo služil tudi za izvedbo meritev v nadaljevanju.



Slika 1. Toroidno jedro s primarnim in sekundarnim navitjem.



Slika 2: Shema merilnega sistema z možnostjo izbire načina vzbujanja.

3 Rezultati

V nadaljevanju so podani rezultati meritev magnetnih lastnosti treh mehkomagnetnih tračnih jedr s tipsko oznako 53/38/27 (zunanji in notranji premer ter višina jedra v mm) pri željeni gostoti magnetnega pretoka B_{ref} (1,6 T, 1,0 T in 0,2 T; sinusen potek) in pri $N_P = N_S = 2$. Poleg zelene (referenčne) vrednosti gostote magnetnega pretoka si v stolpcih (tabela 1) sledijo oznaka vzorca, izmerjena vrednost gostote magnetnega pretoka B_m , efektivna vrednost magnetne poljske jakosti H , relativna permeabilnost, delovna (p_s) in navidezna (s_s) specifična izgubna moč.

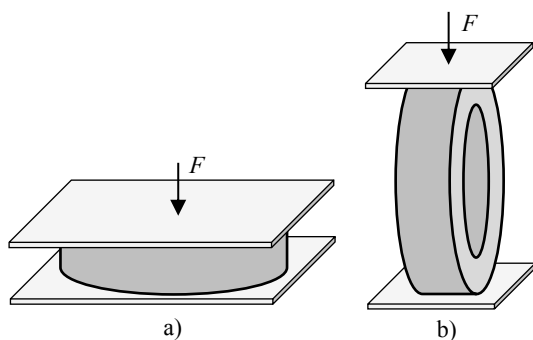
Pri poskusu so bila izbrana tri jedra s približno enakimi parametri, ki so bili pomerjeni/izračunani pred mehansko obremenitvijo (neosenčene vrstice). Do bistvenih sprememb v rezultatih pa pride, če jedro izpostavimo kratkotrajni mehanski obremenitvi, kar je razvidno iz osenčenih vrstic v tabeli 1 (krepko je napisan odstotek spremembe). Po mehanski obremenitvi, ki jo je predstavljal »naključni« padec z višine 1 m na vinilno talno oblogo, vrednosti pomerjenih parametrov pri istih vrednostih zelene gostote B nakazujejo, da je zaradi padca pri obeh jedrih v njuni kristalni strukturi prišlo do deformacij, zaradi katerih bi predhodno sicer ustrezno jedro lahko za naročnika postalo neustrezno. Še posebej je to opazno pri vzorcu št. 2, medtem ko vzorec št. 1 ne izkazuje tako velikih odstopanj glede na meritev pred obremenitvijo. Glede na podane rezultate je vpliv kratkotrajnih mehanskih obremenitev na magnetne lastnosti jedra popolnoma nepredvidljiv. Dejstvo je, da je neustrezno rokovanje z jedrom po končani termični obdelavi zelo kritično, saj se lahko magnetne lastnosti jedra drastično spremenijo.

Druga možnost je trajno prisotna mehanska napetost v jedru kot posledica tehnoloških postopkov (zalivanje jedra v izolativno maso, namestitve navitij, pritrjevanje na podlago).

Tabela 1. Merilni rezultati za dva vzorca po kratkotrajni mehanski obremenitvi

B_{ref} [T]	vzorec	B_m [T]	H [A/m]	μ_r /	p_s [W/kg]	s_s [VA/kg]
1,6	1	1,601	21,53	41198	0,791	0,939
		1,600	23,34	34387	0,820	1,019
			8,4%	-16,5%	3,7%	8,5%
	2	1,600	22,29	37156	0,797	0,975
		1,599	27,35	26144	0,864	1,194
			22,7%	-29,6%	8,4%	22,5%
3	1,600	21,83	39818	0,836	0,944	
	1	1,002	12,67	46690	0,307	0,346
		1,001	12,99	46266	0,315	0,355
		2,5%	-0,9%	2,6%	2,6%	
1,0	2	1,001	12,69	47208	0,305	0,347
		1,000	13,49	44552	0,326	0,368
		6,3%	-5,6%	6,9%	6,1%	
3	0,999	13,65	43813	0,340	0,372	
	1	0,198	3,61	31284	0,014	0,020
		0,200	3,72	30621	0,014	0,020
		3,0%	-2,1%	0,0%	0,0%	
0,2	2	0,200	3,62	31322	0,014	0,020
		0,200	3,88	29363	0,015	0,021
		7,2%	-6,3%	7,1%	5,0%	
3	0,200	3,68	30871	0,015	0,020	

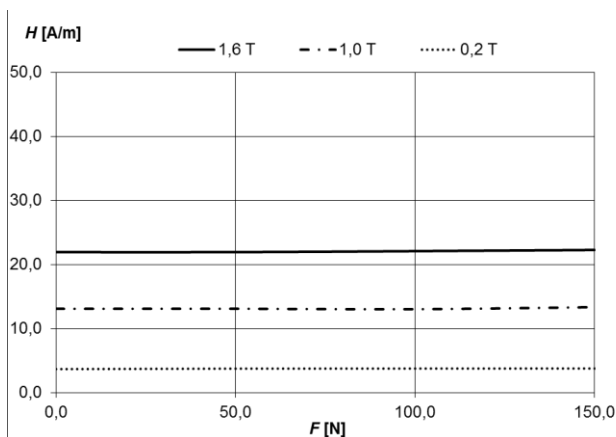
Vpliv trajne obremenitve je bil testiran s tretjim vzorcem, ki je bil vstavljen v namensko zgrajeni jarm, s katerim je bilo mogoče nastaviti obremenitev v razponu od 0 do 150 N, in sicer za primer a) v vzdolžni (osni) smeri in v primeru b) v prečni (radialni smeri), kot je razvidno s slike 3. V obeh primerih je na jedro delovala sila stiskanja zgolj v eni smeri, za pričakovati pa je bilo, da bo vpliv delovanja sile v vzdolžni smeri precej manjši kot v prečni.



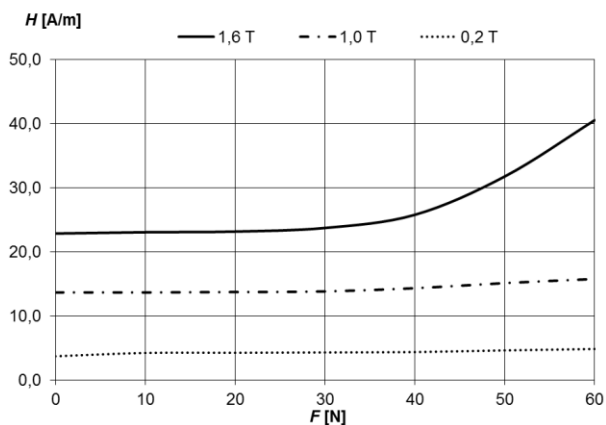
Slika 3. Princip obremenitve merjenca v vzdolžni (a) in prečni smeri (b).

Merilni rezultati magnetne poljske jakosti pri različnih gostotah magnetnega pretoka za vzorec št. 3 in vzdolžno obremenitev so podani na sliki 4, za prečno obremenitev pa na sliki 5.

Kot je bilo pričakovati, je vpliv mehanske obremenitve v vzdolžni smeri minimalen (pri sili 150 N je za enak B povečanje $H \approx 2\%$), opazen postane šele pri silah nad 150 N, ki pa jih z obstoječim merilnikom (LIBELA TENSO) ni bilo mogoče izmeriti. Povsem drugače je pri obremenitvi v prečni smeri. S slike 5 je razvidno, da je za doseganje želene gostote B v jedru v primeru delovanja prečne sile potrebna precej večja magnetna poljska jakost H (sploh pri 1,6 T).

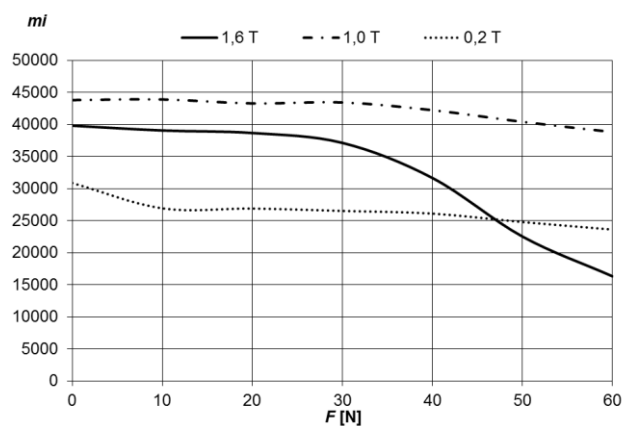


Slika 4. Magnetna poljska jakost pri različnih gostotah v odvisnosti od sile (vzdolžna smer).

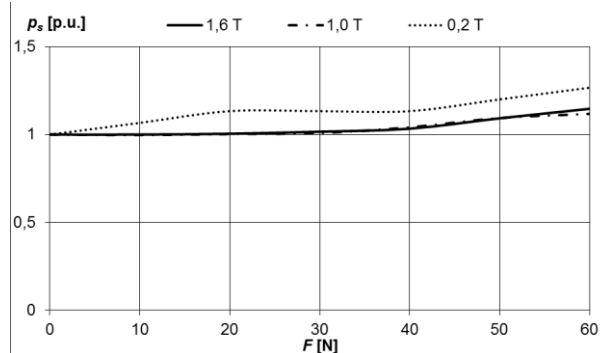


Slika 5. Magnetna poljska jakost pri različnih gostotah v odvisnosti od sile (prečna smer).

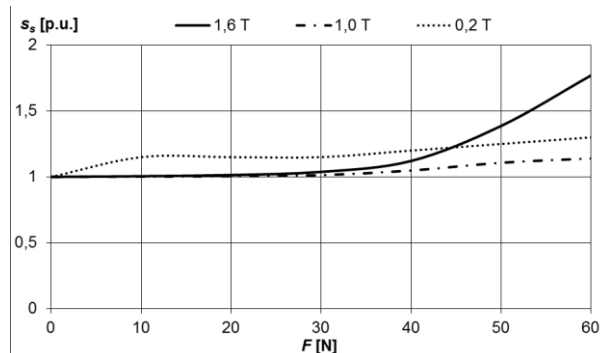
Podobne ugotovitve kot za magnetno poljsko jakost dobimo tudi za ostale izračunane parametre. Na sliki 6 je podan potek relativne permeabilnosti, na slikah 7 in 8 pa delovne in navidezne specifične izgubne moči (p.u.) pri različnih gostotah B v odvisnosti od sile v prečni smeri.



Slika 6. Relativna permeabilnost pri različnih gostotah v odvisnosti od sile (prečna smer).

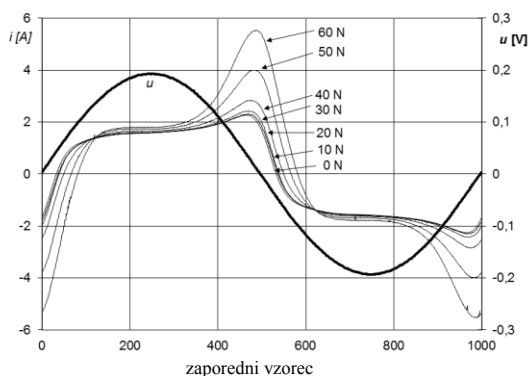


Slika 7. Delovna specifična izgubna moč pri različnih gostotah v odvisnosti od sile (prečna smer).

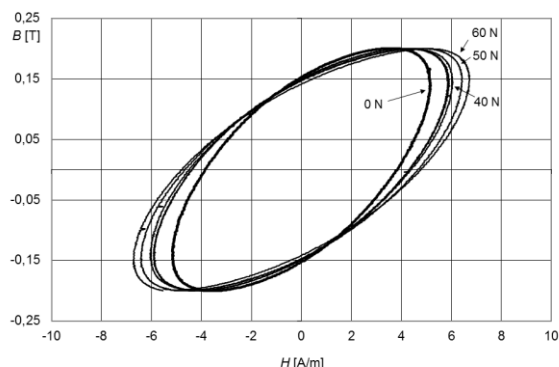


Slika 8. Navidezna specifična izgubna moč pri različnih gostotah v odvisnosti od sile (prečna smer).

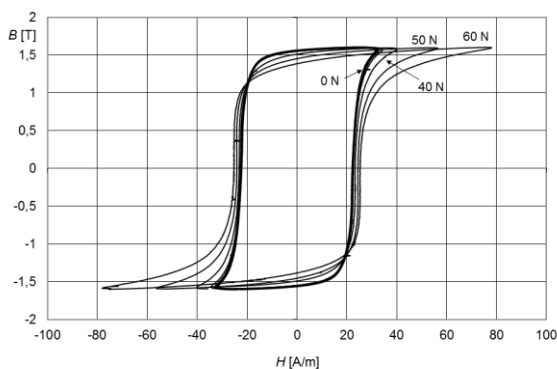
Še boljši vpogled v razmere pri izpostavitvi jedra mehanski obremenitvi nam daje časovni potek ključnih dveh veličin med meritvijo – sekundarne inducirane napetosti in primarnega toka. Izhodišče za grafično predstavitev v obliki »oscilograma« napetosti in toka ter BH histerezne zanke sta tabeli s po 1000 vzorci toka in napetosti na periodo. Na sliki 9 je podan časovni potek sekundarne napetosti pri $B = 1,6$ T in primarnega toka za različne obremenitve v prečni smeri, na sliki 10 pa pripadajoča družina BH histereznih zank.



Slika 9: Časovni potek inducirane napetosti pri $B_{zel} = 1,6$ T in časovni poteki toka pri različnih silah.

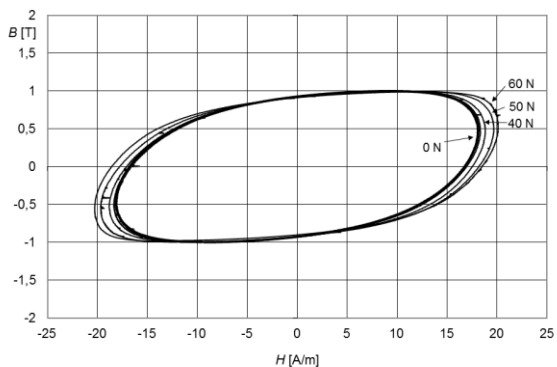


Slika 12: Družina histereznih zank pri $B_{zel} = 0,2$ T in različnih silah.



Slika 10: Družina histereznih zank pri $B_{zel} = 1,6$ T in različnih silah.

Opazno je, da postaja z večanjem mehanske obremenitve histerezna zanka vedno bolj izrazita. Četudi je na prvi pogled (npr. glede na sliko 5) vpliv mehanske obremenitve na magnetne lastnosti jedra pri nižjih gostotah B minimalen, je že s slik 6 – 8, še bolj pa iz družine histereznih zank na slikah 11 in 12 razvidno, da mehanska sila tudi pri nižjih gostotah B nezanemarljivo vpliva na magnetne lastnosti jedra.



Slika 11: Družina histereznih zank pri $B_{zel} = 1,0$ T in različnih silah.

4 Zaključek

V prispevku je raziskan vpliv mehanske obremenitve na magnetne lastnosti tračnih jedr. Izkazalo se je, da se zaradi kratkotrajnega (»naključni« padec na tla) ali trajnega delovanja sile magnetne lastnosti jedra poslabšajo, saj je za doseganje enake vrednosti gostote magnetnega pretoka potreben večji magnetilni tok oz. večja magnetna poljska jakost. Velikost sile in njen vpliv na magnetne lastnosti jedra je sicer odvisen od togosti jedra, pri čemer je npr. pri jedru s tanjšo steno ($d_z \approx d_n$) vpliv pri enaki sili večji kot pri debelostenskem jedru. Na podlagi analize merilnih rezultatov za več tipov jedr (v prispevku so sicer podani rezultati samo za en tip jedra) je mogoče zaključiti, da je za doseganje želenih karakteristik elektromagnetne naprave treba posebno pozornost nameniti vsem fazam proizvodnega postopka, vključno s transportom in rokovanjem z že izdelano napravo.

Literatura

- [1] J. Karthaus, S. Steenjes, N. Leuning and K. Hameyer: Effect of mechanical stress on different iron loss components up to high frequencies and magnetic flux densities, *COMPEL*, vol. 36, no. 3, 2017.
- [2] K. Yoshikawa, Y. Yamada, S. Yamamoto, Y. Mochida, S. Ohashi, Y. Fukunaga, T. Sawai, K. Fujiwara and Y. Ishihara: Evaluation of Magnetic Characteristics of Soft Magnetic Powder Cores under Mechanical Stress, *SEI Technical Review*, no. 67, Oct. 2008.
- [3] J. Sievert, The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel – survey on methods and situation of standards, *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, vol. 215-216.
- [4] G. Modrijan, M. Petkovšek, P. Zajec, D. Vončina: Precision B-H analyser with low THD secondary induced voltage, *IEEE Tr. Ind. Electron.*, Jan. 2008, str. 364-370.
- [5] M. Petkovšek: Magnetne lastnosti tračnih jedr pri različnih načinih vzbujanja, *Elektrotehniški vestnik*, vol. 83, no. 4, 2016.