

Magnetne lastnosti tračnih jeder pri različnih načinih vzbujanja

Marko Petkovšek

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

Povzetek. Magnetne lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder ugotavljamo s posrednim merilnim postopkom, ki temelji na transformatorski metodi. S tokom skozi prvo navitje poskrbimo za magnetenje jedra in s tem sklepamo na magnetno poljsko jakost, inducirana napetost na drugem navitju pa nam posredno daje informacijo o gostoti magnetnega pretoka v jedru. V prispevku je podrobneje predstavljeno ovrednotenje merilnih rezultatov za dva načina vzbujanja jedra, s katerima dobimo celovit vpogled v magnetne lastnosti materiala, kar je ključnega pomena pri zasnovi magnetnega kroga končnega izdelka.

Ključne besede: mehkomagnetni material, magnetna poljska jakost, gostota magnetnega pretoka, izgubna moč, relativna permeabilnost

Magnetic Properties of Wound Cores under Various Magnetization Conditions

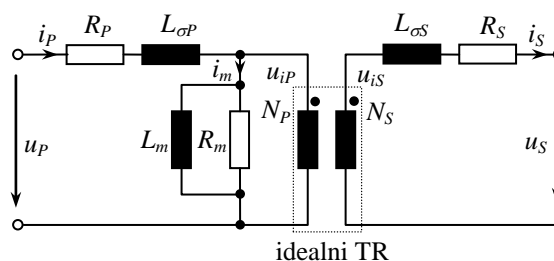
The magnetic properties of the soft-magnetic wound cores are usually assessed by indirect measurement of a test specimen equipped with two windings. With the N_p -turn winding, appropriate magnetic-field strength is established in the specimen due to primary current i_p , whereas with the N_s -turn winding, the magnetic flux density is calculated based on induced voltage u_s . The paper evaluates the measurement results obtained by using the two measurement approaches. In the first one, the specimen is magnetized with a primary current that makes the induced voltage on the secondary side as well as the magnetic-flux density in the core sinusoidal. In the second one, the sinusoidal primary current is causing a sinusoidal magnetic-field strength. It is shown that both approaches allow for a complete insight into the magnetic properties of the material, thus providing crucial information for the magnetic design of the final product.

Key words: soft-magnetic material, magnetic-field strength, magnetic-flux density, power losses, relative permeability

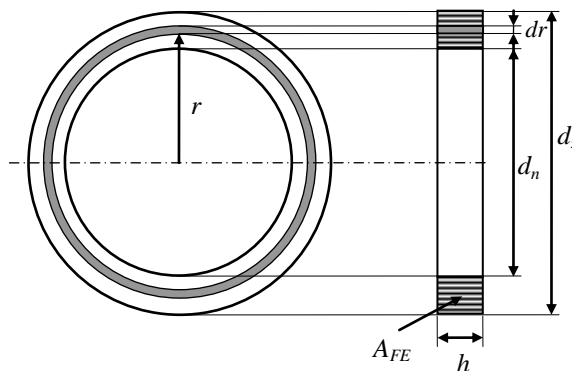
1 UVOD

Pri ovrednotenju lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder nas zanimajo magnetne veličine, kot so gostota magnetnega pretoka, magnetna poljska jakost, relativna permeabilnost, pa tudi moč, ki je potrebna, da v jedru vzpostavimo določene magnetne razmere. Ker taka jedra pomenijo zaključen magnetni tokokrog, lahko magnetne lastnosti ovrednotimo samo posredno prek merjenja električnih veličin [1-3]. V ta namen jedro opremimo z dvema navitjema in ga pravzaprav obravnavamo kot transformator v praznem teku [4]. S tokom i_p skozi primarno navitje (N_p) poskrbimo za ustrezno magnetenje jedra, na sekundarnem navitju z N_s ovoji pa merimo inducirano napetost u_{iS} kot posledico

spreminjajoče se gostote magnetnega pretoka v jedru. Upoštevajoč poenostavljeno nadomestno shemo merjenega jedra (slika 1) lahko hitro pridemo do sklepa, da zaradi odprtih sponk na sekundarni strani tok i_s ne teče, kar pomeni, da je inducirana napetost u_{iS} enaka napetosti u_s na sponkah sekundarnega navitja. Nadaljnja obravnava velja ob predpostavki, da je merjeno jedro toroid s pravokotnim prerezom površine A_{FE} , višine h in notranjim (d_n) ter zunanjim premerom (d_z), kot je podano na sliki 2.



Slika 1: Poenostavljena nadomestna shema merjenega jedra



Slika 2: Prerez tračnega jedra

Glede na odprte sponke u_S na sekundarni strani nadomestne sheme merjenca (slika 1) na primarni strani teče le tok, ki magneti jedro, zato velja

$$\oint H(r)dl = i_P N_P. \quad (1)$$

Magnetna poljska jakost H v jedru v odvisnosti od polmera r je tako

$$H(r) = \frac{i_P N_P}{2\pi \cdot r}, \quad (2)$$

iz česar lahko sklepamo, da vrednost magnetne poljske jakosti v notranjosti jedra ni konstantna. Prav tako ni konstantna tudi gostota magnetnega pretoka B . Zato pri ovrednotenju magnetnih lastnosti jeder uporabljamo povprečno vrednost magnetne poljske jakosti in gostote magnetnega pretoka, ki ju dobimo z upoštevanjem geometrije merjenega jedra. Zapis (2) nam tako ponuja osnovo za izpeljavo izraza za povprečno vrednost magnetne poljske jakosti H , ki bi jo imeli v neskončno tankem jedru s polmerom r s povprečno (srednjo) dolžino magnetne silnice l_{FE} . Magnetni pretok Φ v jedru je ob upoštevanju diferencialno majhnega elementa prereza jedra $dA = h dr$ in osnovne relacije $B = \mu H$, pri čemer je μ permeabilnost jedra, definiran kot

$$\Phi = \int_S B dA = \int_{r_n}^{r_z} \mu H(r) h dr = \mu \frac{i_P N_P h}{2\pi} \int_{r_n}^{r_z} \frac{dr}{r}, \quad (3)$$

kar nas pripelje do rezultata

$$\Phi = \mu \frac{i_P N_P h}{2\pi} \ln\left(\frac{r_z}{r_n}\right). \quad (4)$$

Povprečna vrednost gostote magnetnega pretoka je zato

$$B = \frac{\Phi}{A} = \mu \frac{i_P N_P}{2\pi(r_z - r_n)} \ln\left(\frac{r_z}{r_n}\right) \quad (5)$$

in povprečna vrednost magnetne poljske jakosti upoštevajoč $B = \mu H$

$$H = \frac{i_P N_P}{2\pi(r_z - r_n)} \ln\left(\frac{r_z}{r_n}\right). \quad (6)$$

Izraz (6) bi lahko glede na (2) z definiranjem srednje dolžine magnetne silnice l_{FE} [5] in upoštevanjem časovne odvisnosti zapisali kot

$$H(t) = \frac{i_P(t) \cdot N_P}{l_{FE}}. \quad (7)$$

Srednja dolžina magnetne silnice je pri tem glede na (6) definirana kot

$$l_{FE} = 2\pi \frac{r_z - r_n}{\ln\left(\frac{r_z}{r_n}\right)} = \pi \frac{d_z - d_n}{\ln\left(\frac{d_z}{d_n}\right)}. \quad (8)$$

Poleg magnetne poljske jakosti H je pri ovrednotenju magnetnih lastnosti jedra seveda ključnega pomena tudi gostota magnetnega pretoka B , ki jo v jedru povzročimo z magnetenjem s primarnim tokom i_P .

Tako kot magnetno poljsko jakost tudi gostoto magnetnega pretoka lahko določimo/izračunamo le posredno, in sicer kar z merjenjem napetosti u_S na odprtih sponkah sekundarnega navitja, saj je $u_{iS} = u_S$. Pri N_S ovojih in prerezu jedra A_{FE} je napetost na sponkah enaka

$$u_S(t) = -N_S \frac{d\Phi}{dt} = -N_S A_{FE} \frac{dB}{dt}. \quad (9)$$

Gostota magnetnega pretoka B v jedru je tako

$$B(t) = -\frac{1}{N_S A_{FE}} \int u_S(t) dt. \quad (10)$$

Očitno je, da je v nasprotju z magnetno poljsko jakostjo (7) izračun gostote magnetnega pretoka (10) precej bolj kompleksen.

V nadaljevanju je predstavljen merilni sistem, s katerim je mogoče dobiti celovit vpogled v magnetne lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder, saj omogoča izvedbo meritve na dva (standardizirana) načina. Merilni sistem poleg številskih ponuja tudi grafično predstavitev merilnih rezultatov magnetnih lastnosti materiala, kar pripomore k lažjim odločitvam pri zasnovi magnetnega kroga končnega izdelka.

2 OPIS MERILNEGA SISTEMA

Pri zasnovi merilnega sistema je med drugim treba zagotoviti, da so merilni rezultati ponovljivi, predvsem pa tudi primerljivi z drugimi merilnimi sistemi (npr. pri proizvajalcu in naročniku izdelka).

Ozirajoč se na izhodiščno poenostavljeno shemo merjenega jedra z dvema navitjema sta v principu mogoča dva pristopa. Jedro lahko magnetimo s takim primarnim tokom, da bo sekundarna inducirana napetost ves čas sinusne oblike [6] – govorimo torej o regulirani (sekundarni) napetosti. Pri drugem pristopu pa jedro magnetimo s sinusnim primarnim tokom [7] (regulacija toka), pri čemer bo seveda sekundarna inducirana napetost odražala (v splošnem nesinusni) potek gostote magnetnega pretoka v jedru.

Ker je ovrednotenje magnetnih lastnosti jeder vezano predvsem na podatkovni par magnetna poljska jakost in (pripadajoča) gostota magnetnega pretoka, je pri zasnovi merilnega sistema treba predvideti tudi možnost izbire referenčne veličine. Princip izračuna magnetnih veličin je sicer nekoliko specifičen, saj je splošno privzeto, da pri podajanju magnetne poljske jakosti govorimo o njeni efektivni vrednosti (če ni drugače poudarjeno!), pri gostoti magnetnega pretoka pa o njeni temenski vrednosti.

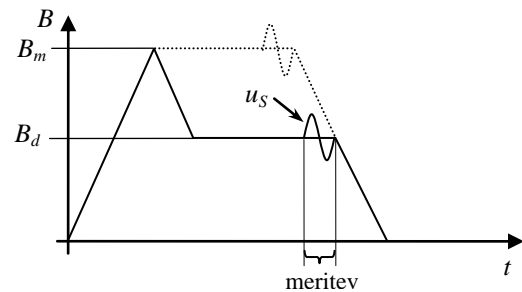
Če je referenčna veličina gostota magnetnega pretoka, potem pri meritvi sledimo zahtevniku naročnika, iz katerega izhaja, za katere temenske vrednosti gostote magnetnega pretoka B_d je treba izvesti meritve. Pri tem za posamezno merilno točko ne sme biti presežena efektivna vrednost magnetne poljske jakosti H .

Druga pot pri izvedbi meritve pa je ta, da po zahtevniku vzpostavimo predpisano efektivno vrednost magnetne poljske jakosti, pri tem pa merimo (izračunamo) temensko gostoto magnetnega pretoka v jedru.

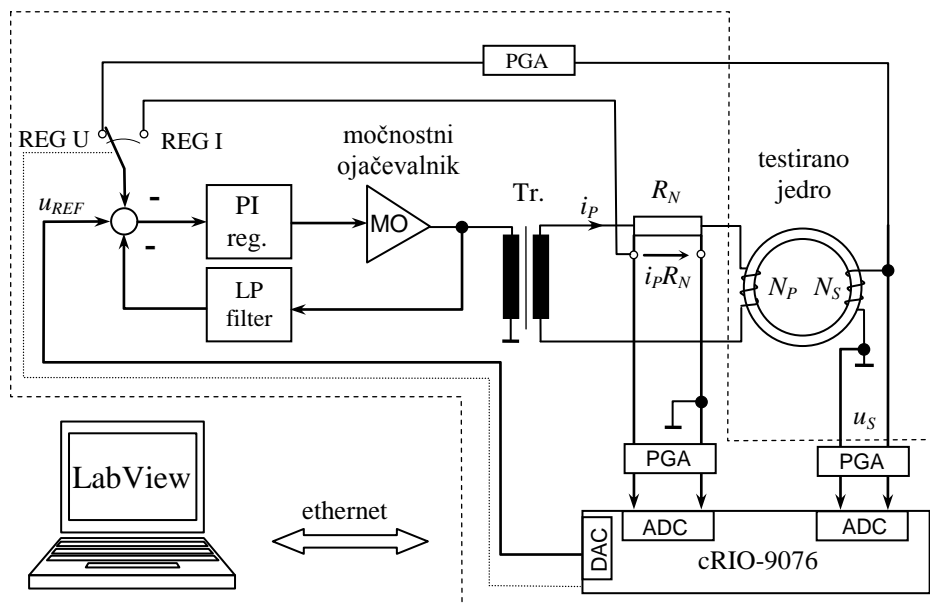
Poseben poudarek pri zasnovi merilnega sistema je treba nameniti tudi postopku pri magnetenju testiranega jedra. Pri tem je treba upoštevati, da jedro ni vedno v popolnoma razmagnetnem stanju, kar je lahko posledica neuspešno izvedene predhodne meritve ali pa neustrezne manipulacije med proizvodnim postopkom. Da bi se izognili napačnim merilnim rezultatom, je treba jedro pred začetkom meritve razmagnetiti ali pa samo izničiti vpliv morebitno prisotne enosmerne predmagnetizacije. To lahko storimo s postopnim magnetenjem vsaj čez koleno magnetilne krivulje (še

raje do nasičenja B_m), nakar jedro razmagnetimo do zahtevane delovne točke B_d , kjer po nekaj periodah (po vzpostavitvi kvazistacionarnega stanja) izvedemo meritve napetosti in toka, čemur sledi razmagnetenje jedra. Primer časovnega profila spreminjanja magnetenja, ko je referenčna veličina gostota magnetnega pretoka B in nas zanimajo razmere v delovni točki B_d , je prikazan na sliki 3 (s črtkano črto je označen primer, ko je $B_d = B_m$).

Glede na množico podanih zahtev, ki jih mora izpolnjevati merilni sistem, je kar nekako logično pričakovati, da je vsem mogoče ugoditi le z uporabo mikrokrmilniško vodene sistema. V nadaljevanju podana razlaga in ovrednotenje eksperimentalnih rezultatov sta vezani na mikrokrmilniško vodeni merilni sistem (slika 4), ki je bil podrobneje predstavljen že v [8] in je bil nadgrajen v [9], zato so na tem mestu podane samo njegove ključne značilnosti.



Slika 3: Profil spreminjanja gostote magnetnega pretoka



Slika 4: Shema merilnega sistema

Merilni sistem je namenjen merjenju magnetnih lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder, ki jih v merilni tokokrog vključimo s 4-polnim konektorjem, s katerim hkrati sklenemo dva primarna in dva sekundarna ovoja. Mikrokrmilnik cRIO-9076 v povezavi z uporabniškim vmesnikom LabVIEW med drugim omogoča generiranje referenčnega sinusnega signala u_{REF} in izbiro regulirane veličine. Pri regulirani napetosti (na sliki 4 označeno z REG U) jedro magnetimo s takim tokom, da je sekundarna napetost sinusne oblike, pri reguliranem toku (REG I) pa tako, da je sinusne oblike primarni tok. Vsako periodo (pri omrežni frekvenci 50 Hz torej vsakih 20 ms) z mikrokrmilnikom zajamemo po 1000 vzorcev primarnega toka in sekundarne napetosti. Tabeli toka in napetosti sta nato prek omrežnega vodila posredovani nadzornemu uporabniškemu vmesniku v programskem okolju LabVIEW na osebнем računalniku, kjer so izvedeni vsi izračuni karakterističnih veličin, poskrbljeno pa je tudi za grafično predstavitev merilnih rezultatov.

3 IZRAČUN KARAKTERISTIČNIH VELIČIN

Pri mikrokrmilniško vodenem merilnem sistemu je seveda logično pričakovati, da je nabor veličin, ki jih je mogoče pridobiti iz tabelarnih podatkov ene periode primarnega toka in sekundarne napetosti, kar obsežen. V nadaljevanju je podan princip izračuna za nekaj najbolj karakterističnih veličin, in sicer za: efektivno magnetno poljsko jakost H , temensko gostoto magnetnega pretoka B , specifično izgubno moč (navidezno s_S in delovno moč p_S) in relativno permeabilnost.

3.1 Izračun efektivne magnetne poljske jakosti

Izhodišče za izračun efektivne magnetne poljske jakosti H je tabela vrednosti primarnega toka. Upoštevajoč osnovno relacijo (7) lahko povzamemo, da je efektivna vrednost magnetne poljske jakosti

$$H = \frac{I_P \cdot N_P}{l_{FE}}, \quad (11)$$

pri čemer I_P pomeni efektivno vrednost primarnega toka, ki jo izračunamo iz tabele 1000 vzorcev ($n = 1000$) toka kot

$$I_P = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} i_{Pj}^2}. \quad (12)$$

3.2 Izračun temenske gostote magnetnega pretoka

Če nas pri meritvi gostote magnetnega pretoka B ne zanima časovni potek, kot ga opisuje (10), ampak samo

vrednost gostote magnetnega pretoka v jedru kot posledica magnetne poljske jakosti H , potem lahko ob predpostavki sinusne oblike napetosti (torej tudi gostote B !) to vrednost izračunamo kot

$$B = \frac{U_S}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \cdot N_S A_{FE}}. \quad (13)$$

V (13) pomeni B temensko (amplitudno) vrednost gostote magnetnega pretoka, U_S pa je efektivna vrednost sekundarne (inducirane) napetosti in f frekvenca napetosti. V magnetiki je pri zapisu za temensko vrednost gostote magnetnega pretoka splošno privzeto, da indeksa ali kakšne druge označbe, ki bi nakazovala na amplitudno vrednost, ne uporabljamo. Če je zahtevano, da kot rezultat meritve podamo efektivno vrednost gostote magnetnega pretoka, potem slednjo podamo kot B_{ef} , B_{RMS} ali podobno.

V konkretnem primeru podatek o temenski gostoti magnetnega pretoka B pridobimo kot amplitudno vrednost časovnega poteka $B(t)$ (10), do katerega pridemo z eno od metod (npr. trapezna) za integracijo tabele diskretnih vrednosti (1000 vzorcev) sekundarne napetosti v uporabniškem vmesniku LabVIEW. Pridobljeni časovni potek gostote magnetnega pretoka nam skupaj s časovnim potekom magnetne poljske jakosti (7), ki je pravzaprav »slika« časovnega poteka primarnega toka, služi za konstruiranje njune medsebojne odvisnosti, ki jo predstavimo v obliki BH histerezne zanke (seveda je tudi iz nje mogoče odčitati temensko vrednost B).

3.3 Izračun specifične izgubne moči

Izgubna moč pri merjenju magnetnih lastnosti je vložena električno moč, ki jo potrebujemo, da v merjenem jedru vzpostavimo zahtevane magnetne razmere.

Pri tem ločimo dva pojma, in sicer delovno moč in navidezno moč [9]. Prvo bi v časovnem prostoru lahko izračunali upoštevajoč število primarnih in sekundarnih ovojev kot

$$P = \frac{N_P}{N_S} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_P u_S dt. \quad (14)$$

V tem primeru pa je izračun delovne moči, ki pomeni izgube zaradi magnetenja jedra, izveden kot

$$P = \frac{N_P}{N_S} \cdot \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} i_{Pj} u_{Sj}. \quad (15)$$

Pogosto se pri meritvah magnetnih lastnosti uporablja tudi pojem navidezna moč, ki je preprosto definirana kot produkt efektivnih vrednosti primarnega toka in sekundarne napetosti.

Z upoštevanjem števila primarnih in sekundarnih ovojev je navidezna moč

$$S = \frac{N_P}{N_S} \cdot I_P U_S . \quad (16)$$

Ker se v proizvodnji tračnih jeder srečujemo z množico različnih tipov (dimenzij) jeder, ki so narejena iz enake pločevine in obdelana po enakem postopku, je za konkretno primerjavo namesto absolutnih vrednosti izgubnih moči bolj smiselno uporabljati podatke o specifični moči. Obe moči dobimo upoštevajoč maso jedra (m_{FE}) takole:

$$p_s = \frac{P}{m_{FE}} \text{ in} \quad (17)$$

$$s_s = \frac{S}{m_{FE}} . \quad (18)$$

3.4 Izračun relativne permeabilnosti

Pri izračunu relativne permeabilnosti je glede na različne pogoje magnetenja v uporabi več pojmov [1] (začetna, amplitudna, kompleksna, diferenčna, inkrementalna, efektivna, remanentna, reverzibilna ...). Na tem mestu je podan izraz za najpogosteje uporabljeno veličino, to je (amplitudno) relativno permeabilnost, ki je definirana kot

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H_m} , \quad (19)$$

kjer je H_m temenska vrednost magnetne poljske jakosti. Kot je razvidno, pri izračunu relativne permeabilnosti uporabljamo temenski vrednosti tako magnetne poljske jakosti kot gostote magnetnega pretoka.

4 OVREDNOTENJE MERILNIH REZULTATOV

Pri ovrednotenju merilnih rezultatov, ki jih pridobimo z izračunom karakterističnih veličin z opisanim merilnim sistemom, lahko hitro pridemo do napačnih sklepov, če dosledno ne navajamo in upoštevamo vseh merilnih pogojev in okoliščin pri izvedbi meritve.

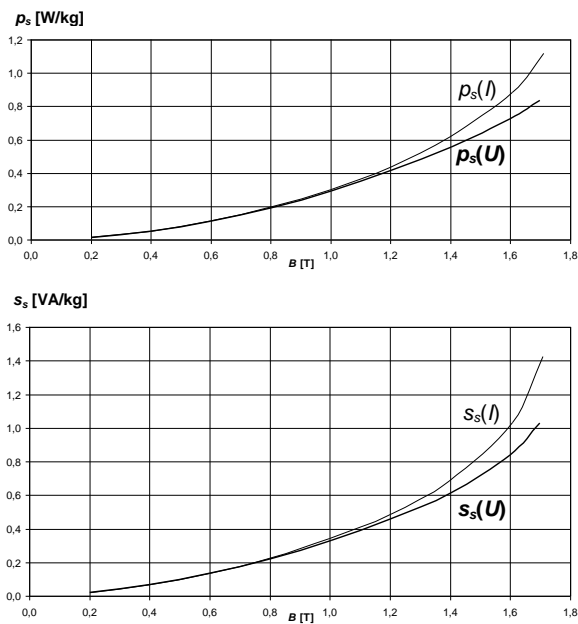
V nadaljevanju bo na primeru merjenja magnetnih lastnosti toroidnega jedra z nazivnimi podatki 53/39/22 (zunanji in notranji premer ter višina jedra v mm) pri frekvenci 50 Hz pokazano, do kakšnih razlik pri merilnih rezultatih lahko privede izvajanje meritve pri dveh načinih vzbujaanja, to je pri sinusnem (reguliranem) poteku sekundarne napetosti in pri sinusnem (reguliranem) poteku primarnega toka. Jedro je bilo v merilni tokokrog obakrat vključeno s 4-polnim konektorjem ($N_P = N_S = 2$). Namesto slik iz uporabniškega vmesnika LabVIEW je grafična predstavitev rezultatov izvedena z grafi Excel. Merilni

postopek je bil v obeh primerih izveden v skladu s predlaganim časovnim profilom, torej s postopnim magnetenjem jedra proti točki nasičenja in nato z meritvijo v zahtevanih delovnih točkah, nakar je sledilo razmagnetenje jedra.

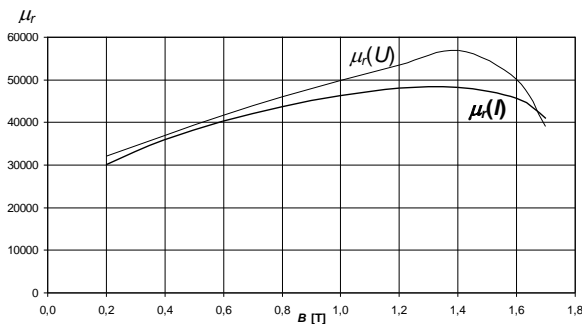
V tabeli 1 so zbrani merilni rezultati za oba načina magnetenja jedra za B_{zel} od 1,7 T do 0,2 T, in sicer za regulirano napetost (neosenčene vrstice) ter za regulirani tok (osenčene vrstice). Iz tabele je razvidno, da je zahtevano gostoto magnetnega pretoka B_{zel} v jedru mogoče doseči s skoraj enakimi vrednostmi efektivne magnetne poljske jakosti, kar bi nas lahko napeljevalo do sklepa, da sta oba načina enakovredna. Večja razlika med merilnimi rezultati pa je opazna pri temenski magnetni poljski jakosti H_m , specifičnih izgubnih močeh in relativni permeabilnosti. Kot je razvidno s slike 5, je specifična izgubna moč v odvisnosti od gostote magnetnega pretoka pri obeh načinih regulacije in nizkih vrednostih magnetenja precej podobna, do opaznih razlik prihaja šele od srednjih vrednosti magnetenja naprej, ko pri reguliranem toku specifične delovne $p_s(I)$ in navidezne izgube $s_s(I)$ postajajo opazno večje od izgub $p_s(U)$ in $s_s(U)$ pri regulirani napetosti. Kot bo pokazano v nadaljevanju, je razlog za to treba iskati v časovnem poteku napetosti in toka pri obeh načinih regulacije. Na sliki 6 je za oba načina regulacije podana odvisnost relativne permeabilnosti od gostote magnetnega pretoka v jedru. Tudi v tem primeru razlike med obema načinoma izhajajo iz različnega časovnega poteka predvsem primarnega toka in s tem magnetne poljske jakosti, kar se v končni posledici odraža v različnih temenskih vrednostih H_m , na podlagi katerih izračunavamo relativno permeabilnost (19).

Tabela 1: Merilni rezultati za dva načina regulacije (sinusna napetost: neosenčene vrstice, sinusni tok: osenčene vrstice)

B [T]	H [A/m]	H_m [A/m]	p_s [W/kg]	s_s [VA/kg]	μ_r /
1,699	22,134	34,548	0,837	1,028	39135
1,701	23,381	33,123	1,120	1,427	40866
1,599	19,098	25,428	0,726	0,836	50041
1,602	19,680	27,979	0,885	1,034	45564
1,401	15,977	19,577	0,555	0,613	56989
1,399	16,237	23,078	0,619	0,687	48240
1,201	13,876	17,854	0,414	0,456	53530
1,200	13,993	19,936	0,438	0,485	47940
1,001	11,999	16,005	0,292	0,329	49870
0,999	12,078	17,207	0,303	0,341	46201
0,801	10,140	13,818	0,191	0,222	46129
0,802	10,258	14,622	0,199	0,230	43647
0,599	8,229	11,431	0,110	0,135	41700
0,598	8,282	11,844	0,114	0,137	40178
0,401	6,100	8,613	0,052	0,067	36957
0,399	6,166	8,856	0,053	0,068	35853
0,200	3,592	4,953	0,014	0,020	32133
0,200	3,653	5,292	0,015	0,021	30075



Slika 5: Specifična izgubna moč v odvisnosti od gostote magnetnega pretoka pri dveh načinih regulacije (zgoraj: delovna p_s , spodaj: navidezna specifična moč s_s)



Slika 6: Relativna permeabilnost v odvisnosti od gostote magnetnega pretoka pri dveh načinih regulacije

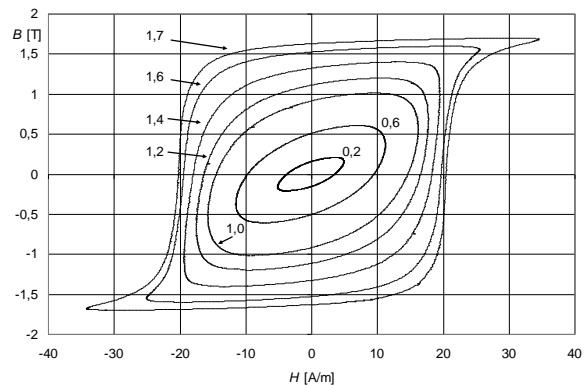
Za celovito sliko razmer v jedru je pri meritvi magnetnih lastnosti poleg številskih vrednosti karakterističnih veličin smiselno podati tudi njihov časovni potek (v času ene periode) ali pa njihovo odvisnost od referenčnega parametra na širšem področju.

Na sliki 7 je tako za različne vrednosti B_{zel} podana družina BH histereznih zank pri regulirani napetosti. Iz takega prikaza je lepo razvidno, kako se z naraščanjem gostote magnetnega pretoka v jedru spreminja oblika histerezne zanke in kdaj (pri kateri gostoti magnetnega pretoka) material začne prehajati v magnetno nasičenje. Pri regulirani napetosti bi tako glede na obliko histereznih zank (slika 7) pri različnih B_{zel} lahko (sicer subjektivno) ugotovili, da material kaže znake magnetnega nasičenja že pri $B_{zel} = 1,4$ T, vsekakor pa je v nasičenju pri $B_{zel} = 1,7$ T.

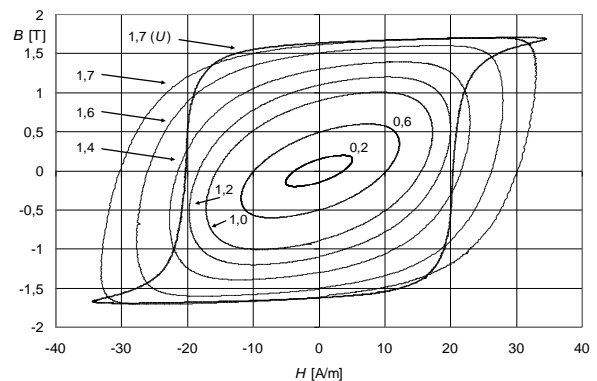
Povsem drugače pa je pri reguliranem toku (slika 8), saj je zaznavanje magnetnega nasičenja samo na podlagi oblike histerezne zanke precej manj opazno. Za

primerjavo je na sliki 8 odebeljeno vrisana tudi histerezna zanka pri regulirani napetosti in $B_{zel} = 1,7$ T; označeno z $1,7 (U)$. Glede na številске merilne rezultate (tabela 1) za delovno točko $B_{zel} = 1,7$ T lahko ugotovimo, da zahtevano gostoto magnetnega pretoka dosežemo s precej podobnimi vrednostmi efektivne magnetne poljske jakosti. Iz merilnih rezultatov (tabela 1) je namreč razvidno, da je efektivna vrednost magnetne poljske jakosti H sicer nekoliko višja v pri reguliranem toku, njena temenska vrednost H_m pa je celo nižja kot pri regulirani napetosti. Po drugi strani pa bi iz primerjave širin obeh histereznih zank (na sliki 8) lahko povsem napačno sklepali, da je pri reguliranem toku magnetna poljska jakost, s katero smo dosegli zahtevano gostoto B_{zel} , bistveno večja. Seveda pa se širša histerezna zanka pozna pri izračunu specifične izgubne moči. Tako delovna p_s kot navidezna specifična moč s_s sta namreč precej večji pri reguliranem toku (tabela 1 in slika 5).

Pri nižjih vrednostih B_{zel} imata histerezni zanki v obeh primerih skoraj enako obliko (sliki 7 in 8 za $B_{zel} = 0,6$ T in $B_{zel} = 0,2$ T), precej podobni pa so tudi merilni rezultati za specifično izgubno moč. Do opaznih razlik za oba načina regulacije prihaja šele pri višjih vrednostih B_{zel} , ko material že kaže (prve znake) magnetnega nasičenja. Vzrok je iskati v različnem časovnem poteku obeh veličin (H in B), ki služita za konstrukcijo BH histerezne zanke, in posledično njuni medsebojni odvisnosti.

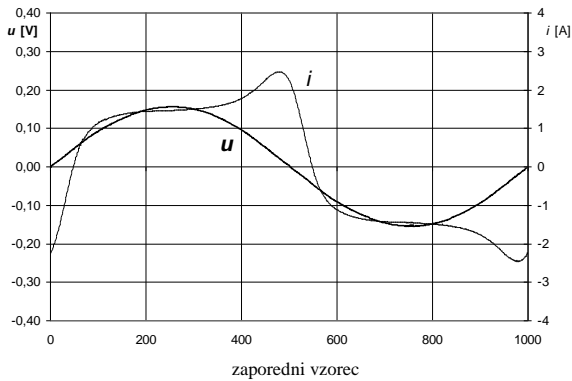


Slika 7: Družina histereznih zank pri regulirani napetosti



Slika 8: Družina histereznih zank pri reguliranem toku

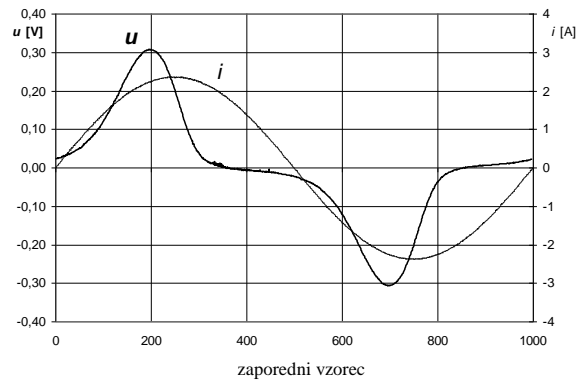
Na sliki 9 sta podana časovna poteka sekundarne napetosti in primarnega toka za eno periodo (1000 vzorcev) za primer regulirane sekundarne napetosti, ko je bila želena gostota magnetnega pretoka $B_{zel} = 1,7$ T. Jedro je bilo v tem primeru magneteno s takim (primarnim) tokom, da je imela sekundarna napetost in s tem tudi gostota magnetnega pretoka v jedru sinusni potek. Iz tabelaričnih podatkov o toku in napetosti sta bila v uporabniškem vmesniku LabVIEW upoštevajoč (8) in (10) najprej izvedena izračun in izris časovnega



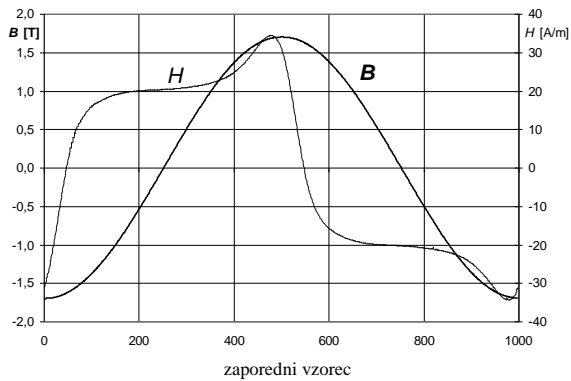
Slika 9: Potek primarnega toka in (regulirane) sekundarne napetosti pri $B_{zel} = 1,7$ T

poteka magnetne poljske jakosti in gostote magnetnega pretoka, ki ju kaže slika 10, in je osnova za prikaz BH histerezne zanke (slika 11).

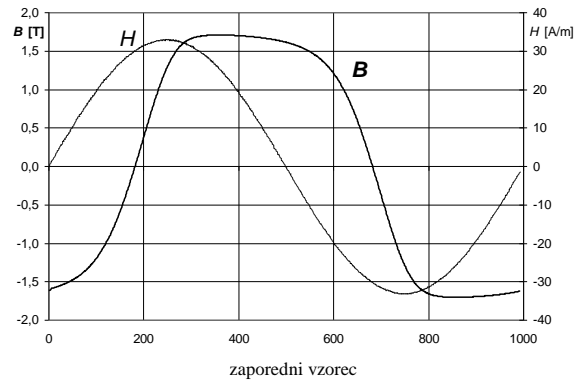
Meritev je bila nato ponovljena, le da je bila tokrat regulirana (sinusna) veličina primarni tok. Na sliki 12 sta podana časovna poteka primarnega toka in sekundarne napetosti, na sliki 13 pa njuni izpeljanki – časovna poteka magnetne poljske jakosti in gostote magnetnega pretoka, ki sta osnova za BH histerezno zanko, ki jo kaže slika 14.



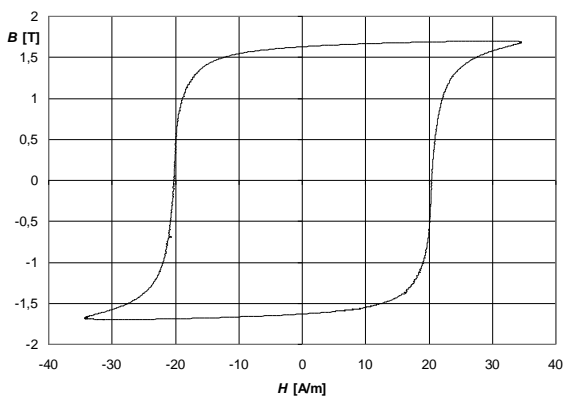
Slika 12: Potek (reguliranega) primarnega toka in sekundarne napetosti pri $B_{zel} = 1,7$ T



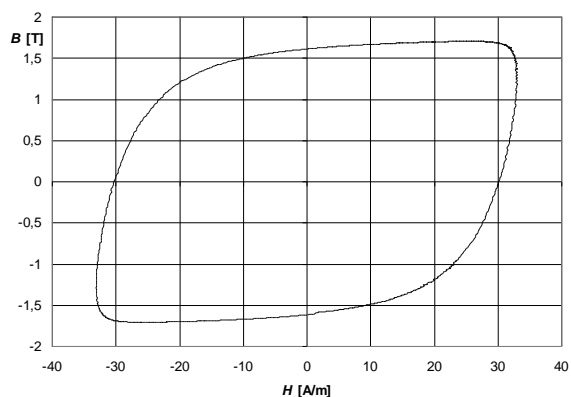
Slika 10: Potek magnetne poljske jakosti in gostote magnetnega pretoka pri $B_{zel} = 1,7$ T in regulirani napetosti



Slika 13: Potek magnetne poljske jakosti in gostote magnetnega pretoka pri $B_{zel} = 1,7$ T in reguliranem toku



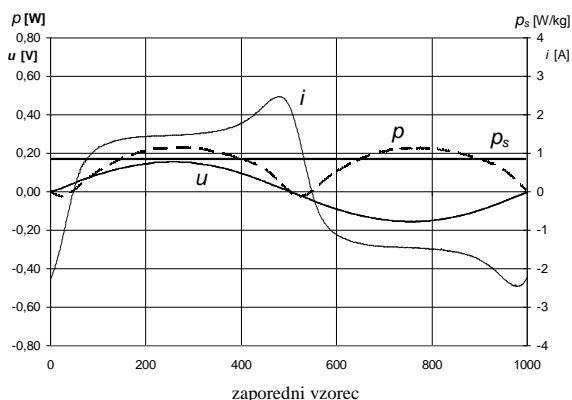
Slika 11: BH histerezna krivulja jedra pri $B_{zel} = 1,7$ T in regulirani napetosti



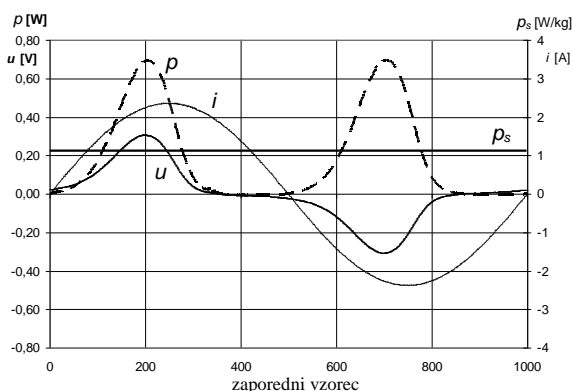
Slika 14: BH histerezna krivulja jedra pri $B_{zel} = 1,7$ T in reguliranem toku

Pri ovrednotenju merilnih rezultatov je neposredna primerjava dveh histereznih zank lahko precej zavajajoča. V pomerjeni delovni točki $B_{zel} = 1,7$ T naj bi jedro po podatkih proizvajalca že bilo v območju magnetnega nasičenja, kar je lepo razvidno iz histerezne zanke jedra pri regulirani napetosti (slika 11) in časovnega poteka toka (slika 9) oz. magnetne poljske jakosti (slika 10). Do povsem drugačnega sklepa pa bi lahko prišli s histerezno zanko pri reguliranem toku (slika 14), saj na prvi pogled sploh še ne izkazuje (očitnih) znakov nasičenja, četudi je iz časovnega poteka sekundarne napetosti (slika 12), nekoliko manj pa iz poteka gostote magnetnega pretoka B (slika 13), spet mogoče sklepati, da bi jedro vendarle moralo biti v magnetnem nasičenju.

Kot je bilo že omenjeno, je vzrok za razlike v izračunu izgubne moči treba iskati v časovnem poteku sekundarne napetosti in primarnega toka. Na slikah 15 in 16 je za oba načina regulacije podan časovni potek trenutne moči p , ki je izračunana kot produkt primarnega toka i in sekundarne napetosti u pri zeleni gostoti $B_{zel} = 1,7$ T. Poleg tega je na slikah prikazana tudi izračunana vrednost specifične delovne izgubne moči p_s , kot izhaja iz (17). Pri tem je upoštevana masa jedra $m_{FE} = 170,25$ g. Specifična delovna izgubna moč pri regulirani napetosti znaša $0,837$ W/kg, pri reguliranem toku pa $1,120$ W/kg.



Slika 15: Trenutna izgubna moč p in izračunana specifična izgubna moč p_s pri regulirani napetosti in $B_{zel} = 1,7$ T



Slika 16: Trenutna izgubna moč p in izračunana specifična izgubna moč p_s pri reguliranem toku in $B_{zel} = 1,7$ T

5 SKLEP

V skladu z mednarodnimi standardi za merjenje magnetnih lastnosti mehkomagnetnih materialov lahko meritev magnetnih lastnosti tračnih jeder izvedemo tako, da je bodisi primarni tok bodisi sekundarna inducirana napetost sinusne oblike, s čimer so zagotovljeni enaki pogoji med meritvijo in seveda primerljivost merilnih rezultatov (med različnimi meritvami ali merilnimi sistemi). Seveda se je treba zavedati, da jedro pri poznejši končni uporabi verjetno ne bo (ali pa bo zelo redko) izpostavljeno takim pogojem, kot so vladali med meritvijo, saj sta sinusna časovna poteka toka (in s tem H) ali pa napetosti (in s tem B) v jedru prej izjema kot pravilo.

Z opisanim merilnim sistemom je mogoče izvesti meritev na dva načina, ki sicer vsake zase podajata korektno sliko razmer v jedru, a je iz primerjave njunih merilnih rezultatov razbrati precejšnje odstopanje, kar bi lahko pripeljalo do napačnih sklepov. Razlike namreč nastajajo zaradi različnega časovnega poteka obeh ključnih veličin, to je primarnega toka in sekundarne napetosti, kar se nato odraža v časovnih potekih gostote magnetnega pretoka in magnetne poljske jakosti, BH histerezni zanki in seveda vseh drugih veličinah. Zato je izbira načina vzbujanja jedra med meritvijo odvisna predvsem od predvidene končne uporabe izdelka.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] J. Chojnacki et al., "Harmonic Distortion of Magnetizing Current in Combined Wound Toroidal Cores," *IEEE trans. Magn.*, 2008, vol. 44, no. 11.
- [3] D. Andessner, R. Kobler, J. Passenbrunner, W. Amrhein, "Measurement of the magnetic characteristics of soft magnetic materials with the use of an iterative learning control algorithm," 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 6–9 Sept. 2011, Chicago, USA.
- [4] Deutsche Norm DIN 50 460, "Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von weich-magnetischen Werkstoffen," 1988.
- [5] R. Boll "Soft Magnetic Materials," *Vacuumschmelze GmbH*, Berlin.
- [6] International standard IEC 404-2, "Methods of measurement of magnetic, electrical and physical properties of magnetic sheet and strip."
- [7] ASTM A772 A772M-00(2005) Standard Test Method for AC Magnetic Permeability of Materials Using Sinusoidal Current.
- [8] 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.
- [9] G. Prešern, "Nadgradnja merilnika magnetnih lastnosti mehkomagnetnih toroidnih jeder," UL, Fakulteta za elektrotehniko Ljubljana, diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija prve stopnje, 2014.

Marko Petkovšek je diplomiral leta 1996, magistriral leta 1999 in doktoriral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je zaposlen kot asistent. Pedagoško in raziskovalno pokriva področje mehatronike s posebnim poudarkom na industrijskih krmilnikih in mikrokrmilniško vodenih močnostnih pretvornikih.