

Primerjava merilnih postopkov za ugotavljanje magnetnih lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder

Marko Petkovšek¹, István Zoltán², Peter Zajec¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

²Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, XI. Magyar tudósok körútja 2, 1117 Budapest, Hungary

E-pošta: marko.petkovsek@fe.uni-lj.si

Povzetek. V prispevku so predstavljene ključne značilnosti ter navedene nekatere prednosti in pomanjkljivosti dveh merilnih pristopov za ugotavljanje magnetnih lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder. Prvi temelji na merilnem principu, pri katerem s tokom skozi primarno navitje vzpostavimo sinusni potek gostote magnetnega pretoka v jedru in s tem posledično sinusno inducirano napetost na sekundarnem navitju. Drugi pristop je izpeljanka impedančne metode za merjenje relativne permeabilnosti, kjer je regulirana veličina magnetilni tok. Medtem ko je prvi pristop največkrat vezan na namensko zgrajeno merilno opremo, lahko pri impedančni metodi meritev izvedemo s komercialno dostopnimi impedančnimi merilniki.

Ključne besede: mehkomagnetni material, gostota magnetnega pretoka, magnetna poljska jakost, kompleksna impedanca

Abstract

The paper describes key features and shows some advantages and disadvantages of two measurement approaches used in determination of magnetic properties of soft-magnetic wound cores. The first approach is based on a measuring principle in which the current through the primary winding determines the sinusoidal magnetic flux density in the core and consequently also the sinusoidal induced voltage in the secondary winding. The second approach is a variation of the impedance method with which complex relative permeability is measured. In it, the controlled variable is the magnetizing current. In the first approach, the custom-made measurement equipment is normally used. The second approach relies on a wide variety of commercially available impedance meters.

1 UVOD

V proizvodnem procesu je končna kontrola kakovosti izdelkov ključen kazalec ustreznosti več predhodnih operacij – od ustrezne izbire vstopnih surovin, pravilnega tehnološkega postopka obdelave materiala do izdelave končnega izdelka. Hkrati je končna kontrola tudi pomembna skupna vez med proizvajalcem in kupcem. Zato je pri njem, da ne bi bilo dvomov o morebitnih napakah v lastnem proizvodnem procesu, opravljena vstopna kontrola kakovosti izdelka ali polizdelka, s pomočjo katere lahko kupec nadzira

proizvajalca oziroma njegovo izpolnjevanje pred tem dogovorjenih meril. Seveda je za korektno primerjavo merilnih rezultatov končne in vstopne kontrole treba pri obeh straneh zagotoviti enake pogoje merjenja.

Primerjava merilnih rezultatov je zato upravičena le pri uporabi merilnih postopkov, ki jih izvedemo skladno z veljavnimi standardi in predpisi za določeno merilno področje. V nadaljevanju prispevka bodo tako za primer merjenja magnetnih lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder podane osnovne zahteve mednarodnega standarda IEC 404-2 in standarda ASTM A772/A772M - 00(2005). Prvi narekuje, da mora biti med meritvijo magnetnih lastnosti gostota magnetnega pretoka B v testiranem jedru sinusne oblike, medtem ko je v drugem primeru zahtevan sinusni potek magnetne poljske jakosti H .

2 SPLOŠNO O MERJENJU MAGNETNIH LASTNOSTI TRAČNIH JEDER

Magnetne lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder po navadi ugotavljamo s pomočjo tako imenovane transformatorske metode, pri kateri na testirano jedro namestimo dve navitji (slika 1). S primarnim navitjem z ovoji N_p v jedru vzpostavimo ustrezno magnetno polje, s sekundarnim navitjem z ovoji N_s pa merimo inducirano napetost kot posledico spreminjajočega se magnetnega polja. Primarni tok povzroča v jedru magnetno poljsko jakost H :

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

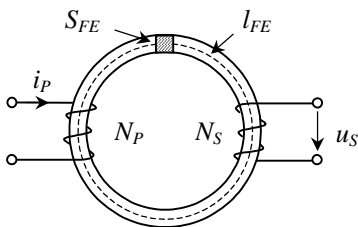
pri čemer je l_{FE} srednja dolžina magnetne silnice. Dolžina magnetne silnice toroidnih jeter pravokotnega prereza je podana z izrazom:

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

V izrazu (2) sta d_z in d_n označena zunanji in notranji premer jedra. Na sekundarni strani se kot posledica spreminjajoče se gostote magnetnega pretoka B inducira napetost:

$$u_S(t) = -N_S \cdot S_{FE} \cdot dB/dt, \quad (3)$$

pri čemer je s S_{FE} označen presek jedra.



Slika 1: Toroidno jedro s primarnim in sekundarnim navitjem

3 MERILNA SHEMA

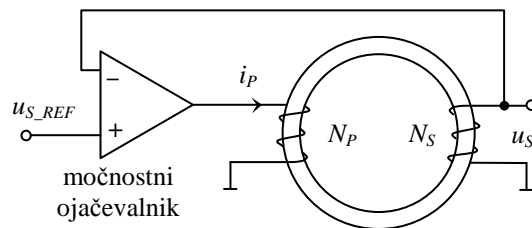
3.1 Sinusna gostota magnetnega pretoka

V tem primeru je testirano jedro magneteno s takim tokom skozi primarno navitje, da sta gostota magnetnega pretoka in posledično na sekundarnem navitju inducirana napetost sinusne oblike. Omenjeni pogoj je po standardu IEC404-2 izpolnjen, če faktor oblike inducirane napetosti odstopa od faktorja oblike za idealni sinusni potek (ta znaša 1,11) za manj kot en odstotek [1]. Temu pogoju najlaže zadostimo z vpeljavo negativne povratne zanke v regulacijski tokokrog [2], kar je razvidno iz poenostavljene sheme na sliki 2. Na vходу močnostnega ojačevalnika je prisotna želena vrednost sekundarne inducirane napetosti u_{S_REF} . Njena efektivna vrednost je ob upoštevanju zahteve po sinusni obliki napetosti in po preoblikovanju izraza (3) proporcionalna maksimalni vrednosti gostote magnetnega pretoka:

$$U_{S_REF} = 4,44 \cdot \hat{B} \cdot f \cdot S_{FE} \cdot N_S, \quad (4)$$

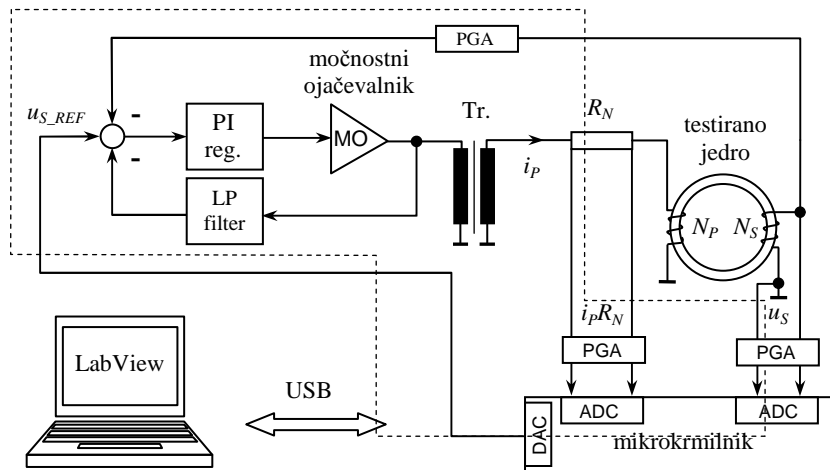
pri čemer je f frekvenca inducirane napetosti. Prednost takšnega regulacijskega pristopa je očitna, saj je za hitro in preprosto ugotavljanje osnovnih dveh magnetnih veličin dovolj, če izmerimo efektivno vrednost primarnega toka in sekundarne napetosti. S prvo meritvijo ob upoštevanju izraza (1) dobimo efektivno vrednost magnetne poljske jakosti H , z drugo pa glede na (4) izračunamo, kakšno povprečno gostoto magnetnega pretoka B (maksimalna vrednost!) smo s primarnim tokom I_P in posledično magnetno poljsko jakostjo H dosegli v jedru.

Če za oceno kakovosti jedra potrebujemo še več podatkov (npr. relativna permeabilnost, specifične izgube, remanentna gostota magnetnega pretoka, koercitivna poljska jakost, grafični prikaz rezultatov,...), je seveda treba k meritvi pristopiti malo bolj kompleksno. Rešitev naloge je mogoča z vključitvijo mikrokrmilniškega sistema, ki poleg generiranja zelene vrednosti sekundarne inducirane napetosti, izvedbe meritve primarnega toka in sekundarne napetosti omogoča izračun pomembnih magnetnih parametrov testiranega jedra. Poleg tega je za preprostejšo uporabo tako mogoče izvesti še povezavo med merilnim sistemom in nadzornim osebnim računalnikom z ustreznim uporabniškim vmesnikom (slika 3; več v [2, 4]).



Slika 2: Princip merilnega vezja z napetostno negativno povratno zanko

Tak merilni sistem je seveda zgrajen strogo namensko – skladno z zahtevami naročnika in seveda z upoštevanjem standardov s področja merjenja magnetnih lastnosti. Žal je zaradi specifičnosti merjenja magnetnih lastnosti in maloštevilnih uporabnikov (večinoma samo proizvajalci jeter in njihovi kupci) na trgu relativno malo ustreznih rešitev uveljavljenih ponudnikov elektronske merilne opreme, kar se posledično pozna tudi pri končni ceni (največkrat unikatnega) merilnega sistema.



Slika 3: Blokovna shema merilnega sistema

3.2 Impedančna metoda s sinusnim tokovnim virom

Večinoma so merilni sistemi za merjenje magnetnih lastnosti zasnovani na merilnem principu, ki je predstavljen v prejšnjem razdelku – s tokom skozi primarno navitje jedro magnetimo tako, da je inducirana napetost na sekundarnem navitju sinusne oblike. To nam precej poenostavi izračun osnovnih dveh magnetnih veličin (H , B), saj je seveda poleg poznavanja parametrov testiranega jedra (mehanske dimenzije, polnilni faktor) treba samo pomeriti efektivni vrednosti primarnega toka in sekundarne napetosti. Precej manj pa je razširjen princip, pri katerem je magnetenje jedra izvedeno s sinusnim primarnim tokom – tu napetost na sekundarnem navitju ni (vedno) sinusne oblike. Pomanjkljivost takega pristopa je očitna, saj je izračun osnovnih dveh magnetnih veličin bolj kompleksen – vsaj pri izračunu gostote magnetnega pretoka B . V ta namen namreč ne moremo uporabiti poenostavljenega izraza (4), temveč le osnovno relacijo med inducirano napetostjo in gostoto magnetnega pretoka, ki jo opisuje (3). Medtem ko smo pri merilnem principu s sinusno sekundarno inducirano napetostjo preprost izračun magnetne poljske jakosti in gostote magnetnega pretoka načeloma lahko izvedli brez mikrokrmilniške podpore, tega pri sinusnem primarnem toku ni mogoče storiti. A vendar je z nekaterimi omejitvami mogoče tudi v tem primeru meritev magnetnih lastnosti opraviti zadovoljivo dobro brez mikrokrmilnika oziroma brez zahtevnih računskih operacij, pri tem pa vseeno uporabiti preprosto relacijo za izračun gostote magnetnega pretoka.

V nadaljevanju bo opisan merilni princip, ki temelji na standardiziranem postopku za merjenje izmenične oz. kompleksne permeabilnosti s sinusnim vzbujalnim tokom [5]. Merilni princip je upravičen za merjenje permeabilnosti v območju od zelo nizkih pa do srednjih gostot magnetnega pretoka, oziroma do maksimuma

permeabilnosti, kjer material prehaja v območje magnetnega nasičenja. Po tej metodi dobljeni rezultati permeabilnosti so sicer numerično nekoliko nižji kot v primeru merilnih postopkov s sinusno gostoto magnetnega pretoka, a je prednost metode boljša dostopnost merilne opreme. V ta namen namreč lahko uporabimo različne impedančne merilnike. Prednost metode je tudi preprostejša vključitev merjenca v tokokrog, saj je merilni princip zasnovan na samo enem navitju (slika 4). Testirano jedro z enim samim navitjem tako obravnavamo pravzaprav kot dušilko z železnim jedrom. Pri tem na podlagi vsiljevanja sinusnega toka (50 Hz) skozi navitje merimo kompleksno impedanco navitja.

Za doseganje ustrezne gostote magnetnega pretoka v jedru potrebujemo ustrezno velik magnetilni tok. Njegova velikost je pogojena s številom primarnih ovojev in velikostjo jedra, kar je razvidno iz (1), a je tok v želji po čim manjšem številu ovojev (lažja vključitev v merilni tokokrog!) vseeno lahko velikostnega reda nekaj amperov. Seveda takega toka večina impedančnih merilnikov ni zmožna zagotavljati, kar pa pomeni, da se moramo pri izvedbi meritve zateči k večjemu številu primarnih ovojev.

Pri meritvi kompleksne impedance navitja je treba upoštevati tudi upornost navitja (R_{DC}), ki jo prej izmerimo pri enosmernem vzbujanju. Ob upoštevanju upornosti navitja tako dobimo korigirano vrednost kompleksne impedance Z_{corr} :

$$Z_{corr} = R_S + jX_S, \quad (5)$$

ali izraženo s faznim kotom φ :

$$Z_{corr} = |Z_{corr}| \cdot e^{j\varphi}. \quad (6)$$

Ob poznavanju korigirane kompleksne impedance in faznega kota lahko nato izračunamo absolutno vrednost kompleksne permeabilnosti μ_r oziroma obe njeni

komponenti (μ'_S in μ''_S) – izrazi veljajo za serijsko nadomestno vezavo testiranca [6]:

$$|\mu_r| = \sqrt{\mu'^2_S + \mu''^2_S}, \quad (7)$$

$$\mu'_S = \frac{L_S}{\mu_0 N_P^2 \frac{S_{FE}}{l_{FE}}}, \quad (8)$$

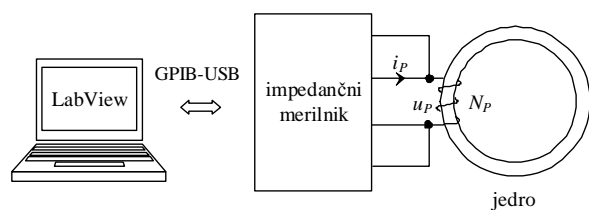
$$\mu''_S = \frac{R_S}{\omega \mu_0 N_P^2 \frac{S_{FE}}{l_{FE}}}. \quad (9)$$

Če zdaj upoštevamo, da je magnetilni tok sinusne oblike, je tudi gostota magnetnega pretoka v jedru vsaj pri neizraženem magnetnem nasičenju materiala tudi sinusne ali vsaj približno sinusne oblike. To pa bi nam dovoljevalo uporabo izraza (4) za izračun gostote magnetnega pretoka B na podoben način kot v predhodnem razdelku.

Ob znani efektivni vrednosti magnetilnega toka in korigirani kompleksni impedanci je tako mogoče izračunati napetost U :

$$U = |Z_{corr}| \cdot I, \quad (10)$$

s pomočjo katere pa z upoštevanjem (4) lahko izračunamo maksimalno vrednost povprečne gostote magnetnega pretoka v jedru.



ika 4: Shema merilnega sistema z impedančnim merilnikom

SI

Po preureditvi izraza (4) dobimo:

$$\hat{B} = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot S_{FE} \cdot N_P}. \quad (11)$$

S poznavanjem kompleksne impedance pa lahko določimo tudi nazivno in delovno izgubno moč:

$$S = I^2 \cdot |Z_{corr}|, \quad (12)$$

$$P = I^2 \cdot |Z_{corr}| \cdot \cos \varphi. \quad (13)$$

4 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Pri ovrednotenju predstavljene metode merjenja magnetnih lastnosti tračnih jeder z impedančnim merilnikom (Precision Magnetics Analyser, Wayne Kerr 3260B, [7]) smo slednjega opremili z vmesnikom

GPIB-USB, ki nam je omogočal izvedbo avtomatiziranega merilnega postopka s pomočjo aplikacije LabView na nadzornem osebнем računalniku.

Pred začetkom meritve je bilo treba testirano jedro razmagnetiti, kar smo storili z zagonom posebne rutine, ki je izhodni tok merilnika (pri frekvenci 50 Hz) postopoma zmanjševala od prednastavljene vrednosti, ki je bila izračunana glede na pričakovano vrednost maksimalne magnetne poljske jakosti (1), proti vrednosti nič. Po razmagnetitju, s katerim smo odpravili vpliv morebitnega predhodnega magnetenja ali nepravilno izvedene meritve, smo začeli meriti kompleksno impedanco s postopnim povečevanjem magnetilnega toka do predhodno izračunane maksimalne vrednosti (za $H = 30$ A/m). Vsi izračuni in grafična predstavitev merilnih rezultatov so bili izvedeni v okviru nadzornega uporabniškega vmesnika (LabView) na osebнем računalniku.

Kritično ovrednotenje tako dobljenih merilnih rezultatov smo nato izvedli na podlagi primerjave z merilnimi rezultati, ki smo jih dobili z merilnim postopkom, podanim v razdelku 3.1, in ki temelji na sinusni sekundarni inducirani napetosti (laboratorijski merilnik MDK [3, 4]). Kljub temu, da je testirano jedro pri impedančni metodi izpostavljeno popolnoma drugačnim pogojem – regulirana in s tem sinusna veličina je namreč (magnetilni) tok in ne inducirana (sekundarna) napetost, merilni rezultati vsaj v spodnjem delu magnetilne krivulje popolnoma sovpadajo z rezultati, dobljenimi z merilnikom MDK.

V nadaljevanju so podani rezultati primerjalnih meritev za toroidno tračno jedro tipa 60/50/30 (zunanji in notranji premer ter višina jedra v mm) s polnilnim faktorjem 0,95. Meritev smo izvedli z $N_P = 35$ ovoji, pri čemer je bila ohmska upornost navitja $R_{DC} = 74$ mΩ. Število primarnih ovojev je bilo izbrano glede na maksimalni izhodni tok impedančnega merilnika (200 mA) in predvideno magnetno poljsko jakost pri gostoti 1,6 T, ki za uporabljeni material jedra znaša okoli 30 A/m.

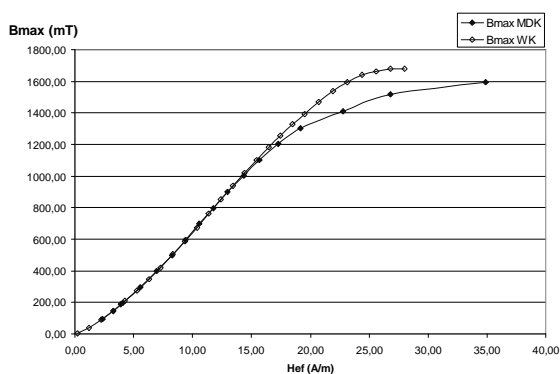
Na sliki 5 je podana na podlagi impedančne metode izračunana gostota magnetnega pretoka B (indeks WK) v odvisnosti od magnetne poljske jakosti (magnetilni tok od 0 do 140 mA). Prav tako je na isti sliki podana tudi krivulja z merilnimi rezultati, dobljenimi z merilnikom MDK. Opazimo lahko, da so merilni rezultati tako rekoč identični v spodnjem območju magnetilne krivulje – nekje do vrednosti $H = 15$ A/m. Od te vrednosti magnetne poljske jakosti naprej pa se merilni rezultati začenjajo razlikovati, saj se material približuje območju magnetnega nasičenja. Četudi jedro magnetimo s sinusnim tokom, pomerjena napetost ni več sinusna (merilnik pravzaprav meri efektivno vrednost napetosti pri danem toku in nato izračuna ter prikaže vrednost kompleksne impedance!). Seveda od

to naprej osnovna predpostavka, ki upravičuje tako izvedeno meritev magnetnih lastnosti, ni več izpolnjena in so vsi nadaljnji izračuni napačni.

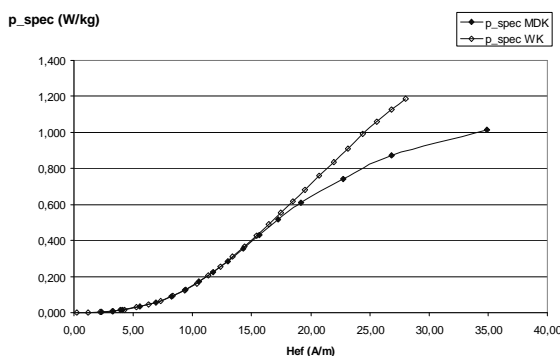
Na slikah 6 in 7 sta podana poteka specifičnih izgubnih moči (W/kg oz. VA/kg) za različne stopnje magnetenja jedra – podobno kot na sliki 5 tudi tu primerjalno za oba načina merjenja (indeks WK in MDK).

Tudi iz teh dveh slik je mogoče ugotoviti, da so izračunani rezultati specifičnih izgubnih moči v spodnjem območju magnetilne krivulje z obema merilnima postopkoma popolnoma identični.

Z impedančno meritvijo bi torej lahko izvajali tudi zahtevnejše meritve magnetnih lastnosti jeter, a v omejenem območju – samo v spodnjem delu magnetilne krivulje materiala.

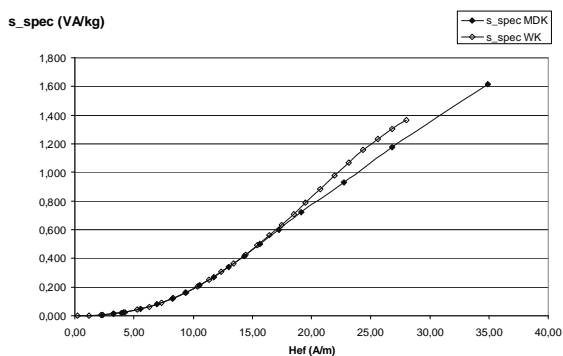


Slika 5: Potek gostote magnetnega pretoka v odvisnosti od magnetne poljske jakosti

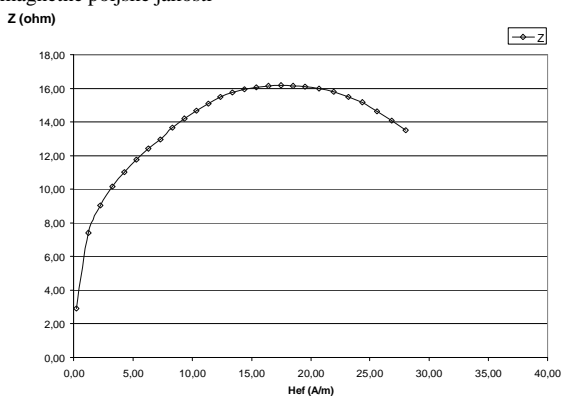


Slika 6: Potek specifične delovne izgubne moči v odvisnosti od magnetne poljske jakosti

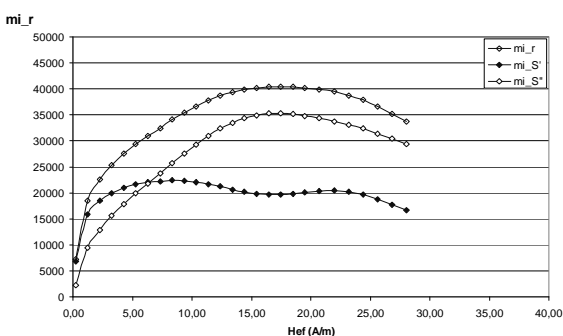
Seveda je ključno vprašanje, do katere vrednosti magnetne poljske jakosti lahko zaupamo tako dobljenim merilnim rezultatom. Sploh, če nimamo vedno na voljo merilnega sistema za izvedbo primerjalne meritve ali pa instrumenta, ki bi nas opozoril, da je material že v območju magnetnega nasičenja.



Slika 7: Potek specifične nazivne izgubne moči v odvisnosti od magnetne poljske jakosti



Slika 8: Potek kompleksne impedance v odvisnosti od magnetne poljske jakosti



Slika 9: Potek kompleksne permeabilnosti in obeh komponent v odvisnosti od magnetne poljske jakosti

Na podlagi analize več meritev tračnih jeter se je izkazalo, da je precej dober kazalec uporabnega območja kar kompleksna impedanca sama, ki je že tako in tako glavna merjena/izračunana veličina. Njen potek v odvisnosti od magnetilnega toka oziroma magnetne poljske jakosti (slika 8) je namreč vedno funkcija z relativno izrazitim maksimumom. Z maksimumom kompleksne impedance je tako hkrati definirana tudi magnetna poljska jakost, do katere merilnim rezultatom še lahko zaupamo, kar pa je povsem v skladu z osnovnim principom meritve kompleksne permeabilnosti [2].

Seveda lahko s pomočjo merilnih rezultatov za kompleksno impedanco izračunamo tudi kompleksno permeabilnost (7) in njeni komponenti (8, 9). Potek kompleksne permeabilnosti in obeh komponent v odvisnosti od magnetne poljske jakosti je podan na sliki 9. Iz slike je razvidno, da je pri kompleksni permeabilnosti vrh krivulje dosežen pri enaki magnetni poljski jakosti kot pri kompleksni impedanci na sliki 8.

5 SKLEP

V prispevku sta podrobneje predstavljena dva pristopa za merjenje magnetnih lastnosti tračnih jeder. Namen primerjave merilnih pristopov je predvsem pokazati, ali je mogoče s komercialno dostopno merilno opremo opraviti tudi zahtevnejše meritve magnetnih lastnosti in ali je tako dobljene rezultate sploh mogoče primerjati z rezultati standardiziranih merilnih postopkov.

Prednost prvega pristopa je nedvomno sinusna sekundarna inducirana napetost, ki precej poenostavi izračun gostote magnetnega pretoka v jedru za dano stopnjo magnetenja. Načeloma je podatka o magnetni poljski jakosti H in gostoti magnetnega pretoka B mogoče dobiti posredno prek merjenja efektivnih vrednosti primarnega toka in sekundarne napetosti (torej že z dvema merilnikoma efektivne vrednosti). Kot slabo stran pa bi vsekakor omenili relativno zahteven močnostni del za zagotavljanje ustreznega magnetilnega toka, saj mora regulacijska shema obvezno vsebovati negativno povratno zanko inducirane napetosti. Pri merjenju magnetnih lastnosti toroidnih jeder je treba posebno pozornost nameniti vključitvi merjenja v merilni tokokrog. Glede na obliko jedra, ki je za namestitev merilnih navitij izrazito neugodna, je seveda zaželeno, da je primarnih in sekundarnih ovojev čim manj. To posledično pomeni, da mora močnostni del zagotavljati relativno velik (primarni) tok. Seveda je pri majhnem številu sekundarnih ovojev tudi inducirana napetost na sekundarnem navitju relativno majhna. Zato omenjene značilnosti merilnega pristopa narekujejo uporabo namensko zgrajenega mikrokrmilniško vodenega merilnega sistema, ki po navadi vključuje tudi nadzorni osebni računalnik z ustreznim uporabniškim vmesnikom za nastavitev merilnih pogojev, grafično predstavitev merilnih rezultatov, izpis in arhiviranje merilnih rezultatov ipd.

Pri drugem pristopu (sinusni magnetilni tok) je načeloma močnostni del preprostejši, saj je dovolj uporabiti ustrezen (tokovna zmogljivost!) sinusni tokovni vir. Sam merilni pristop je v principu namenjen merjenju kompleksne permeabilnosti, v prispevku pa smo želeli pokazati, kako tak postopek uporabiti tudi za obširnejšo analizo magnetnih lastnosti. Merilni postopek v tem primeru temelji na merjenju kompleksne impedance navitja, ki ga namestimo na merjenec. Na

podlagi izmerjene kompleksne impedance lahko nato izračunamo gostoto magnetnega pretoka pri dani magnetni poljski jakosti. A tak izračun je seveda upravičen in pravilen le ob sinusni (inducirani) napetosti, ki je posledica sinusne gostote magnetnega pretoka v jedru! Te pa v opisanem merilnem postopku nimamo pod kontrolo, saj je regulirana in s tem sinusna veličina (magnetilni) tok. Kljub temu je primerjalna analiza merilnih rezultatov obeh predstavljenih merilnih pristopov pokazala, da je uporaba impedančne metode v spodnjem območju magnetilne krivulje materiala povsem upravičena. Zgornja meja uporabnega območja metode je določena z magnetno poljsko jakostjo, pri kateri kompleksna impedanca doseže maksimum. Kljub nekaterim prednostim predstavljene impedančne metode pa seveda ne smemo prezreti dejstva, da merilni pristop ni povsem v skladu s standardom in ga zaradi nekaterih poenostavitev zato ne moremo uporabljati v končni kontroli kakovosti izdelkov, temveč le kot pripomoček za hitro kontrolo kakovosti izdelkov med proizvodnim procesom.

ZAHVALA

V prispevku je del predstavljenih rezultatov pridobljen v okviru podoktorskega študija, ki ga je finančno podprla institucija Hungarian Scholarship Board (HSB).

LITERATURA

- [1] International standard IEC 404-2, "Methods of measurement of magnetic, electrical and physical properties of magnetic sheet and strip."
- [2] M. Petkovšek, P. Zajec, D. Vončina, J. Nastran, "Merilnik magnetnih lastnosti mehkomagnetnih toroidnih jeder," *Elektrotehniški vestnik*, 2002, letn. 69, št. 3-4, str. 186-190.
- [3] ASTM A772 A772M-00(2005) Standard Test Method for AC Magnetic Permeability of Materials Using Sinusoidal Current.
- [4] G. Modrijan, M. Petkovšek, P. Zajec, D. Vončina, "Merjenje lastnosti mehkomagnetnih materialov pri visoki stopnji magnetnega nasičenja," *Inf. MIDEM*, jun. 2006, letn. 36, št. 2, str. 95-101.
- [5] 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.
- [6] R. Boll "Weichmagnetische Werkstoffe," *Vacuumschmelze GmbH*, Berlin, 1977
- [7] www.waynekertest.com

Marko Petkovšek je diplomiral leta 1996, magistriral leta 1999 in doktoriral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zdaj je asistent na isti fakulteti in se ukvarja z mikrokrmilniško vodenimi močnostnimi viri na področju industrijske elektronike.

István Zoltán je doktoriral leta 1987 na Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Budapest University of Technology and Economics. Zdaj je izredni profesor na oddelku za merilne in informacijske sisteme, kjer se ukvarja z merilno tehniko, še posebej s samokalibracijo merilnih instrumentov.

Peter Zajec je diplomiral leta 1994, magistriral leta 1997 in leta 1999 zagovarjal doktorsko disertacijo na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je zdaj zaposlen kot docent. Težišče njegovega raziskovalnega dela je na področju statičnih izmeničnih pretvornikov.