

MOGUĆNOST POBOLJŠANJA KARAKTERISTIKA IMPULSNIH MAGNETIZERA

Radiša Dimitrijević, Holding "Kablovi" a.d. Jagodina DOO Institut FKS
Goran Jovović, Ministarstvo pravde Republike Srbije

Sadržaj – U radu se analizira mogućnost poboljšanja pogonskih karakteristika impulsnog magnetizera, kod kojih se primenjuje efekat koncentrisanja magnetnog fluksa u maloj zapremini pomoću vrtložnih struja. Na osnovu dosadašnjeg eksperimentalnog rada sa takvim aparatom sagledani su, pored prednosti, i neki nedostaci postojeće konstrukcije, koje bi trebalo otkloniti u daljem razvoju ovakvih mašina. Jedan od načina da se poboljšaju njegove eksploatacione mogućnosti mogao bi biti povećanje broja navojaka pobudnih namotaja za datu rezultatnu magnetopobudnu silu, a posebno napona na njegovim krajevima. Problem dobijanja magnetne indukcije većih vrednosti (preko 3 T) i potpunije iskorišćavanje eksploatacionih mogućnosti jedne gotove mašine (impulsnog magnetizera) vezan je i za obezbeđivanje odgovarajućeg energetskog izvora za napajanje. Na kraju, da bi ovakve mogućnosti imale i praktičan smisao, potrebno je imati i odgovarajuće materijale za magnećenje, a u krajnjoj liniji i viziju o primeni takvih materijala.

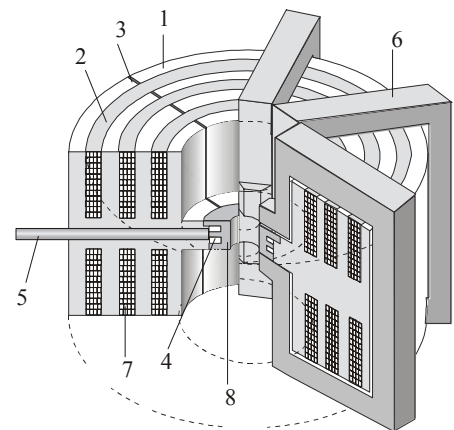
1. UVOD

U proizvodnji stalnih magneta, odnosno električnih uređaja sa stalnim magnetima namenski konstruisani impulsnog magnetizera igraju važnu ulogu. Osnovna prepostavka od koje se ovde polazi je da se prisustvo vrtložnih struja velikog intenziteta u masivnim metalnim strukturama specifične konstrukcije može iskoristiti za dobijanje jakih magnetnih polja u maloj zapremini. Od interesa za magnećenje su posebno materijali iz kategorije amorfni metalnih legura retkih zemalja neodimijuma i samarijuma (Nd, Sm) sa gvožđem i kobaltom (Fe, Co). Naročito je u proizvodnji permanentnih magnetnih komponenti interesantna legura u vidu izotropnog ili anizotropnog praha $Nd_xFe_yB_{1-x-y}$. Željene karakteristike takvih materijala se mogu postići samo određenim tretmanom u pogodnom magnetnom i termičkom polju. Ovako postavljen cilj istraživanja je po svom karakteru multidisciplinarni i u okviru njega treba rešiti veliki broj problema praktične prirode. Iako ovi fenomeni kod nas nisu dovoljno obrađeni, došlo je u okviru jednog projekta [1] do praktične realizacije impulsnog magnetizera (slika 1), sa osnovnim ciljem da se u laboratorijskim uslovima steknu prva praktična iskustva u merenju impulsnih magnetnih polja i impulsnom magnećenju uzoraka nekih amorfni legura.

2. OSNOVNE KONSTRUKTIVNE KARAKTERISTIKE IMPULSNOG MAGNETIZERA

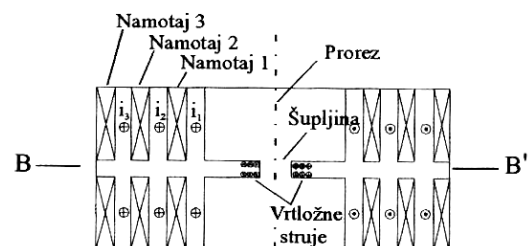
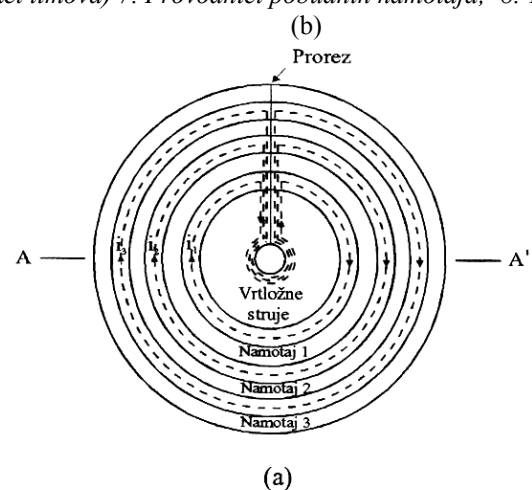
Konstrukcija impulsnog magnetizera sa slike 1 predstavlja poboljšanu verziju konstrukcije iz zadnje generacije impulsnih magnetizera [1]. Osnovni delovi ove konstrukcije su bakarni cilindar sa prorezom, pobudni namotaji, magnetno kolo, centralni deo (tuljak) i sistem za hlađenje. Magnetizer radi u tranzijentnom režimu, što znači da se magnećenje

materijala obavlja u vrlo kratkom periodu (reda 10 ms). Strujni impuls se pomoću prekidačkog sklopa seče u trenutku kada dostiže maksimum, čime se ostvaruje potpuno iskorišćenje magnetizera. Magnetno polje u centru magnetizera stvaraju njegovi pobudni namotaji, ali osnovna i najveća komponenta magnetnog polja potiče od vrtložnih struja u centralnom tuljku, koje se u njemu i koncentrišu, zahvaljujući prorezu u bakarnom cilindru (slika 2).



Sl. 1. Impulsnog magnetizera sa višeslojnim namotajem

1. Bakarni cilindar; 2. Pobudni namotaji; 3. Prorez; 4. Otvori za hlađenje; 5. Kanal za hlađenje; 6. Magnetno kolo (paket limova) 7. Provodnici pobudnih namotaja; 8. Tuljak.



Sl. 2. Raspodela vrtložnih struja: a) pogled odozgo; b) prerez

b) u preseku namotaja.

Radi zaštite od eventualnog pregrevanja predviđen je i sistem za hlađenje. Zbog pojave skin efekta, odnosno neravnomerne raspodele struje u masivnom bakarnom cilindru, koja se javlja u svim provodnicima naizmenične struje, čiji je poprečni presek veliki, treba koristiti debljine zida bakarnog cilindra, koje su jednake ili malo veće od dubine skina. U ovom slučaju usvajena je debljina bakarnog zida prostora za smeštaj namotaja 10 mm, s obzirom da je dubina skina 8,4 mm pri 50 Hz [10], pa je povećanje debljine zida, sa ciljem da se povećaju vrtložne struje, besmisleno. Svi pobudni namotaji su motani u istom smeru, tako da se komponente magnetnih polja, koje potiču od svakog namotaja ponaosob, sabiraju u centru.

Namotaji se mogu lako prilagođavati za redno ili paralelno vezivanje i za napajanje iz trofaznog ili monofaznog izvora. U ranijim radovima [1-8] detaljno su opisani približni analitički i numerički proračun magnetnog polja, termički proračun, kao i rezultati merenja magnetne indukcije u centru magnetizera za slučaj redno vezanih pobudnih namotaja.

3. PREDLOZI ZA POBOLJŠANJE PERFORMANSI

Mada po svojim konstruktivnim karakteristikama predstavlja generator velikih magnetnih indukcija, pri eksperimentima sa impulsnim magnetizerom nisu ostvarene željene velike vrednosti magnetne indukcije [1,4]. Jedan od razloga svakako je nedostatak adekvatnog izvora napajanja, zbog čega je bilo teško postići veliku struju pobude. U tabeli 1 date su izmerene i proračunate maksimalne vrednosti magnetnih indukcija, gde se može zapaziti dobra usaglašenost ovih vrednosti. U daljoj analizi biće razmotreni neki predlozi za poboljšanje performansi magnetizera povećanjem broja navojaka i povećanjem napona.

Tabela 1. Izmerene maksimalne vrednosti indukcije $B_{m\ mer}$ za različite pobudne struje I_p pri naponu U i vrednosti indukcije dobijene analitičkim proračunom B_m

I_p (A)	U (V)	$B_{m\ mer}$ (T)	B_m (T)
10	50	0,09	0,069
20	60	0,125	0,138
30	75	0,19	0,207
40	120	0,25	0,276
50	190	0,3	0,344
60	220	0,35	0,415
120	220	0,75	0,829
180	220	1,1	1,242

a) Povećanje broja navojaka

Približan analitički izraz za komponentu magnetne indukcije koja potiče od jednog pobudnog namotaja glasi:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{NI_p}{l} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (1)$$

gde je: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m magnetna permeabilnost vakuuma
 N - broj navojaka jednog namotaja
 I_p - pobudna struja kroz provodnik
 l - visina namotaja

θ_1 i θ_2 - odgovarajući uglovi prema sl. 3.

Druga komponenta magnetnog polja u centru, koja je od posebnog interesa, je komponenta usled vrtložnih struja koja se približno računa po obrascu:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I_v}{r_1} \quad (2)$$

gde je: I_v - približan intenzitet vrtložnih struja u tuljku
 r_1 - srednji poluprečnik tuljka sa slike 3, koji za ovu konstrukciju iznosi 30 mm

S druge strane, približan intenzitet vrtložnih struja u tuljku biće:

$$J = \sigma E \quad (3)$$

gde je: J - gustina vrtložnih struja u tuljku $J = I_v S$
 S - poprečni presek tuljka

σ - provodnost bakarne ploče $58 \cdot 10^6$ S/m

E_{ef} - efektivna vrednost jačine električnog polja koja se računa prema izrazu:

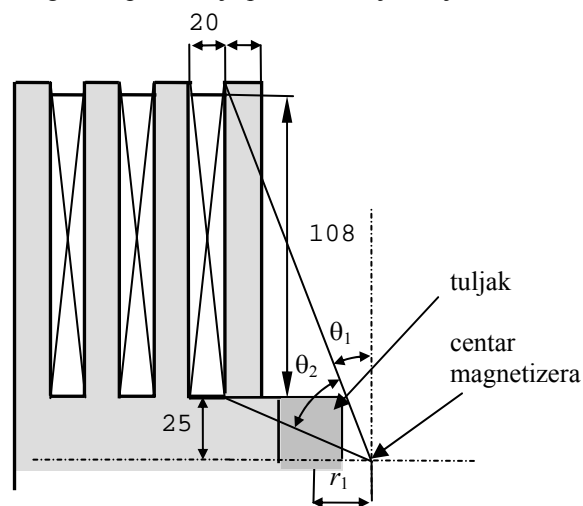
$$E_{ef} = \frac{\mu_0 \cdot r_1 \cdot N \cdot I_v \cdot \omega}{4 \cdot l} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (5)$$

Kako je $I_v = N \cdot I_p$ izraz (5) dobija oblik:

$$E_{ef} = \frac{\mu_0 \cdot r_1 \cdot N^2 \cdot I_p \cdot \omega}{4 \cdot l} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (6)$$

Dakle, iz izraza (1) i (6) se vidi da su dve veličine koje bitno mogu uticati na vrednost magnetne indukcije pobudna struja i broj navojaka namotaja, pri čemu gustina struje u tuljku zavisi od kvadrata broja navojaka N .

Obzirom na vreme trajanja impulsa može se reći da struju ograničava samo njegov omski otpor, bez učešća induktivnog otpora. To znači da bi povećanje magnetne indukcije putem povećanja pobudne struje bilo rizično, pa bi iz tih razloga bilo praktičnije povećati broj navojaka.



Sl.3. Deo poprečnog preseka impulsnog magnetizera

Pod pretpostavkom da induktivni otpor namotaja ne ograničava struju u kratkotrajnom režimu rada, zbog linearne zavisnosti otpora i dužine provodnika, odnosno broja navojaka, za istu vrednost mps $N \cdot I_p$ i pri istom naponu postićiće se obrnuta proporcionalnost broja navojaka i pobudne struje. To znači da se jedna projektovana vrednost magnetnog polja može postići delovanjem manje struje, ali se u tom slučaju mora i srazmerno povećati broj navojaka. Nije

bez značaja spomenuti i to, da su tada manji preseći provodnika lakši za motanje namotaja.

b) Povećanje napona napajanja

Mnogo značajnije povećanje magnetne indukcije može se očekivati povećanjem napona napajanja. Broj navojaka namotaja u cilju povećanja ostvarene magnetne indukcije u centru magnetizera se može povećavati do mere, koju diktira prostor za smeštaj namotaja. Nakon toga se ponovo treba osvrnuti na mogućnost da se struja poveća, što se može ostvariti povećanjem napona napajanja. Električna sila po navojku zavisila bi u tom slučaju od sprege namotaja, pa bi za redno vezane namotaje bila:

$$E_1 = U / (3N) \quad (7)$$

a maksimalna vrednost pobudne struje približno:

$$I_m = \frac{U_m}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (8)$$

gde su: R_1, R_2 i R_3 otpornosti pojedinih namotaja na 20 °C.

Kriterijum za određivanje maksimalnog dozvoljenog porasta temperature provodnika u toku magnećenja je toplotni impuls:

$$A = I^2 \cdot t \quad (9)$$

Snagu uređaja, potrebnog za napajanje magnetizera, treba računati sa veličinama (efektivnim vrednostima struje i napona) u stacionarnom režimu rada po opštem obrascu:

$$S = 3 \cdot U \cdot I \quad (10)$$

uz napomenu da pri izračunavanju struje jednog namotaja treba uzeti u obzir njegovu impedansu Z :

$$Z = \sqrt{R^2 + (L_s + M)^2} \quad (11)$$

gde je L_s sopstvena induktivnost namotaja, a M međusobna induktivnost.

Treba naglasiti da je praktično merenje pojedinih veličina (struja, napon, magnetna indukcija) otežano zbog činjenice da se radi o prelaznom (impulsnom) režimu rada, pa u tu svrhu treba koristiti instrumente sa mogućnošću snimanja i memorisanja tranzijentne promene. U tom slučaju bi potpuno bilo opravdano u proračunu koristiti i trenutne, odnosno maksimalne vrednosti pojedinih veličina.

U praksi je ostvarena magnetna indukcija od 11,2 T pri naponu 1350 V i snazi napajanja od 111 kVA [14].

4. ZAVRŠNA ANALIZA SA PRIMEROM PRORAČUNA

Na osnovu rezultata u dosadašnjim istraživanjima sa impulsnim magnetizerom na slici 1, moguće je dati neke zaključke u pogledu smernica za dalji razvoj ovakvih mašina i uključiti ih u nove proračune, kako je to učinjeno u prethodnoj analizi. U tabeli 2 predstavljeni su neki značajniji rezultati i dato poređenje očekivanih i dobijenih vrednosti za veličine od interesa.

Što se tiče materijala koji bi se koristili za magnećenje, od značaja za primenu u magnetizmu je izotropna legura u prahu $Nd_xFe_yB_{1-x-y}$ koja se dobija procesom brzog očvršćavanja. Stalni izotropni NdFeB magneti, proizvedeni brizganjem ili presovanjem, imaju prednosti u mnogim primenama, jer je njihova proivodnja vrlo fleksibilna. Na primer, mogu se proizvesti u relativno složenom obliku sa odličnim tolerancijama koje nisu vezane za alat, što je

posebno korisno za male električne mašine, gde se vrši ulivanje prstenastog magneta na osovinu i rotor jezgra. Značajna osobina NdFeB magneta je što se promenom zapreminskog punjenja magnetnog praha, njegove osobine mogu prilagođavati specifičnim potrebama u praksi. Pored toga, njegove mehaničke osobine mogu se dodatno poboljšati dodavanjem odgovarajućih materijala, kao što su kevlar ili ugljenična vlakna, mada se time smanjuje postignuto zapreminsko punjenje magnetnog praha. Uprkos tome, on se može koristiti kod mašina velikih brzina, u kojima mehanička naprezanja prevazilaze vrednosti koje bi bile normalne za sinterovane magnetne. Iako ga po kvalitetu može prevazići anizotropni prah, izotropni NdFeB magnet će ostati značajan za praksu, jer anizotropni prah zahteva dodatne i često komplikovane faze proizvodnje.

Tabela 2. Tabelarni prikaz dela proračuna impulsnog magnetizera.

Veličina	Postojeće vrednosti	Projektovane vrednosti	Komentar
Dimenzije prov. (mm)	13 × 2	8 × 1,6	Za dimenzije provodnika sa izolacijom od laka dodati 0,22 mm
Broj navojaka u žlebu	8 × 6 = 48	12 × 10 = 120	
Broj navojaka po fazi	96	240	
Otpor provodnika R_1, R_2 i R_3 (Ω)	0,0263	0,0658	mereno na 20 °C
	0,0324	0,081	
	0,0384	0,096	mereno na 100 °C
	0,0353	0,088	
	0,0434	0,109	
	0,0515	0,128	
Očekivana struja magn. I_m (A) u toku 0,1 s	2265 < 9486 max	4651 max	analit. vred. (8)
	180	-	merena vred. (Tab.1)
Dozv. maks. struja (A) za dati presek	3000	1471	kriterijum (9): dozv.porast temperature provodnika do 100 °C za 1 s
Električna sila (V/nav)	0,76	1,1	za rednu vezu namota (7)
Napon (V)	220 < 921 max	1130 max	
Ukupna magnetna indukcija (T)	1,1	-	merena vred. (Tab.1)
	8,6	oko 16	analit. vred. (1) + (2)

5. ZAKLJUČAK

Posmatrajući rezultate koje prikazane u tabeli 2 mogu se izvesti ovi zaključci:

- Za provodnike koristiti isključivo profilisanu bakarnu žicu sa izolacijom od laka ili ređe od impregnisanog papira, odgovarajuće temperaturne klase;
- U proračunima, koriste se vrednosti otpora provodnika na 20 °C, zbog kratkotrajnog procesa magnećenja;

- Velika odstupanja analitičke i merene vrednosti struje magnećenja posledica su nedostatka odgovarajućih instrumenata za merenje i snimanje prelaznih procesa;
- Analitičke maksimalne vrednosti za struju i napon su neprekoračive i preporučuju se samo kao orijentacione vrednosti, dok se eksperimentom ne provere;
- Povećanje priključenog napona je efikasnije u postizanju velikih magnetnih indukcija od povećanja broja provodnika;
- Magnetizer treba napajati preko jake mreže i uređaja stabilnog napona, koji neće značajnije opasti tokom magnećenja. Omogućiti da napon napajanja bude promenljiv do maksimalne dozvoljene vrednosti;
- U daljem razvoju magnetizera, treba takođe posvetiti pažnju i prekidačkom sklopu, koji umesto sporih elektromagnetnih komponenti, treba da sadrže brze elektronske prekidače na bazi tiristora.

LITERATURA

- [1] G. Jovović, Generisanje magnetskih polja na bazi efekta vrtložnih struja, doktorska disertacija, Čačak 2000. godine.
- [2] G.Jovović D.Stojanović, Približan analitički proračun magnetne indukcije u generatorima jakih magnetnih polja ETRAN V.Banja 1998.
- [3] G.Jovović, D.Stojanović, R.Dimitrijević: Matematičko modelovanje magnetnog polja u generatoru velikih magnetnih indukcija ETRAN Zlatibor Juni 1999.
- [4] G.Jovović, D.Stojanović, R.Dimitrijević: Jedan novi pristup analitičkom proračunu magnetnog polja u generatorima velikih magnetnih indukcija ETRAN Zlatibor Juni 1999.
- [5] G.Jovović, D.Stojanović, R.Dimitrijević: Konstrukcija generatora velikih magnetnih indukcija, X simpozijum Energetska elektronika Ee'99 Novi Sad Novembar 1999.
- [6] G.Jovović, D.Stojanović, R.Dimitrijević: Merenje magnetne indukcije u generatoru jakih magnetnih polja, X internacionalni simpozijum Energetska elektronika Ee'99 Novi Sad Novembar 1999.
- [7] G.Jovović, D.Stojanović, R.Dimitrijević: Jedan nov pristup matematičkom modelovanju magnetnog polja u generatoru velikih magnetnih indukcija ETRAN Zlatibor Juni 2000.
- [8] G.Jovović, D.Stojanović, R.Dimitrijević: Termičko polje u generatoru velikih magnetnih indukcija, XII internacionalni simpozijum Energetska elektronika Ee 2003 Novi Sad Novembar 2003.
- [9] G.W.Jewell, D.Howe, C.D.Riley, The Design of Radial-Field Multipole Impulse Magnetizing Fixtures for Isotropic NdFeB Magnets, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33 No 1, January 1997. pp. 708-722.
- [10] Derek Craik, MAGNETISM – Principles And Application, 1995.
- [11] J.E.L.Bishop, The analysis of eddy-current-limited magnetic domain wall motion, including severe bowing and merging, J.Phys.D, Appl.Phys., Vol.6, pp.97-115, 1973.
- [12] J. Surutka, Elektromagnetika, Beograd 1978.
- [13] K.Besso, S.Yamada, M.Kooto, T.Minamitami, AC High Magnetic Field Generation Due to Eddy Current Concentration Effect, Int. Symp. on Electromagn.Fields ISEF 87, Sept. 87 Pavia Italia, pp. 5-8.
- [14] K.Besso, S.Yamada, M.Kooto, M.Masahashi, M.Nakano, Characteristics of a Multilayer Eddy Current AC Magnetic Coil with a Cooling System, J.Appl.Phys.64, 15 Nov 1988. pp.6020-6022.
- [15] K.Besso, S.Yamada, M.Kooto, AC High Field Generator using Multilayer Eddy Current Type Coil, Phicia Scripta 39, pp 636-638, 1989.
- [16] K.Bessho et. al., : AC High Magnetic Field Generator Based on the Eddy Current Effect, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, No5, 970-972, 1986.
- [17] K.Bessho et. al.,:Asymmetrical Eddy Current and Concentration Effect of Magnetic Flux in a High Speed Rotating Discs, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-21, No6, 1747-1749, 1985.
- [18] K.Besso, S.Yamada, M.Kooto, M.Hayashigishi, M.Furuta, Analysis of a Novel Laminated Coil Using Eddy Currents for AC High Magnetic Field, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25 No 4, July 1989. pp. 2855-2857.
- [19] R.H.Pry, C.P.Bean, Calculation of The Energy Loss in Magnetic Sheet Materials Using A Domain Model, Appl.Phys., Vol.29, pp.532-533, 1958.
- [20] S.X.Chen, J.L.Munoz, Theoretical Eddy Current Permeability Spectra of Slab with Bar Domains, , IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33 No 3, May 1997. pp. 2229-2244.

Abstract. In this paper a possibility of improving the service performance of impulse magnetizer is analyzed, where the effect of concentration of magnetic flux in the small volume is used. On the base of previous experimental work with such machine, beside the advantages, there are some disadvantages, which should be removed in the future research. One of the way to improve its possibility could be increasing the number of turns of exciting coils for determined magnetic force and, especially, applied voltage. The problem of getting high flux density (over 3 T) and more complete utilizing of possibility of a ready machine (impulse magnetizer) are connected with providing of corresponding power supply. In order to have practical purpose of this possibility, there should be corresponding materials for magnetizing and finally, vision about the application of these materials.

POSSIBILITY OF IMPROVING THE PERFORMANCE OF IMPULSE MAGNETIZER

Radiša Dimitrijević, Goran Jovović