

STRUJNI TRANSFORMATOR KAO SISTEM ZA NAPAJANJE ELEKTRONSKOG MERNOG SKLOPA

K. KASAŠ-LAŽETIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, R. Srbija

D. HERCEG, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, R. Srbija

N. PETROVIĆ, d.o.o. "Energobull", Novi Sad, R. Srbija

T. PAPIĆ, ODS "EPS Distribucija" d.o.o Beograd, Beograd, R. Srbija

M. PRŠA, Novi Sad, R. Srbija

UVOD

U firmi d.o.o. „Energobull“ u Novom Sadu je razvijen sklop za merenje faznih napona i faznih jačina struja u trofaznim vazдушnim vodovima distributivnih naponskih nivoa. Merni uređaj je ugrađen u izolatorski sistem priključenja svakog od faznih provodnika i planira se postavljanje tog sistema na određenim stubovima distributivnih nadzemnih vodova. Da bi uređaj mogao da funkcioniše, neophodno je obezbediti njegovo efikasno napajanje jednosmernim naponom 6 V, uz potrošnju definisanu jačinom struje od 150 mA.

Napajanje elektronike naponskim transformatorom napona primara, $U_p = 20$ kV bi bilo jako nepraktično zbog neopohodne izolacije, koja bi uslovlila transformator veoma velikih dimenzija. Zbog toga je, kao osnova za napajanje elektronskog mernog sklopa, sagledana mogućnost korišćenja strujnog transformatora u svakoj od faza trofaznog sistema.

Strujni transformator treba da bude postavljen tako da obuhvata fazni provodnik i da se u njegovim zavojcima indukuje elektromotorna sila dovoljna za napajanje elektronskog mernog uređaja. Pri tome je predviđeno da se u sklop za napajanje ugradi elektronski stabilizator napona napajanja, koji bi taj napon održavao konstantnim pri ulaznim naponima od 6 V do 40 V.

Da bi napajanje elektronskog mernog sklopa bilo najefikasnije, ulogu u stabilizaciji napona napajanja treba da preuzme i zasićenje feromagnetskog jezgra, čime bi se postigli manji gubici u elektronskom stabilizatoru. Pri tome bi bilo poželjno da zasićenje nastupi pri što manjim jačinama struja u provodniku. Da bi se smanjili gubici u feromagnetskom jezgri, jezgro treba da bude napravljeno od veoma kvalitetnog magnetskog materijala, odnosno, od magnetski mekog materijala sa veoma malim vrednostima koercitivnog polja. Time bi se značajno smanjili gubici usled histerezisa, dok bi se gubici usled vrtložnih struja smanjili izborom limova što manje debljine. O svemu tome je vođeno računa pri ispitivanjima prikazanim u ovom radu.

Pošto je, pri malim jačinama struja kroz provodnik, elektromotorna sila indukovana u namotaju transformatora nedovoljna za direktno napajanje elektronskog mernog sklopa, u tom sklopu je predviđena i punjiva litijum-

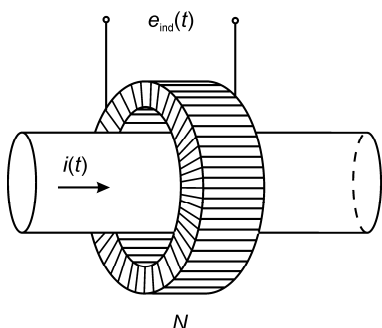
jonska baterija od 3,6 V, koja obezbeđuje kontinuitet u napajanju sklopa. Za vreme kada je fazna struja dovoljnog intenziteta, odnosno, elektromotorna sila indukovana u namotaju strujnog transformatora dovoljno visoka, vrši se punjenje baterija.

Zbog nelinearnosti i zasićenja feromagnetskog jezgra, čak i kada se poznaju sve magnetske karakteristike jezgra strujnog transformatora, analitički proračun broja zavojaka transformatora koji bi, pri određenim jačinama struje kroz provodnik (do 100 A) omogućio optimalno napajanje mernog sklopa, nije moguć, pa je ceo problem rešavan merenjima i analizom rezultata merenja.

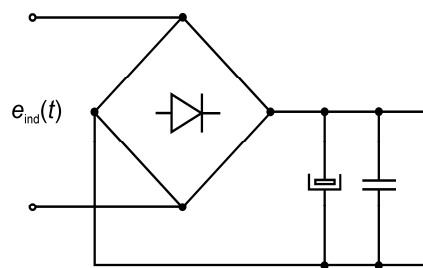
Prikazana merenja su izvršena za različite jačine struja u provodniku, na dva modela strujnog transformatora. Prvi model strujnog transformatora je bio sa otepcima na 25, 50, 75 i 100 zavojaka, dok je drugi imao 100, 150 i 200 zavojaka. Meren je napon na namotaju transformatora, i ustanovljeno je pri kojoj jačini struje i pri kom broju zavojaka je napon na priključcima transformatora dovoljan za napajanje mernog sklopa, a kad napajanje preuzima baterija. Osim toga, određeno je i pod kojim uslovima dolazi do zasićenja feromagnetskog jezgra. Na osnovu svega toga je definisan optimalan broj zavojaka transformatorskog namotaja.

TEORIJSKA OSNOVA RADA

Konstrukcija strujnog transformatora je prikazana na slici 1, a standardni poluprovodnički ispravljački sklop, koji se priključuje na krajeve namotaja transformatora je prikazan na slici 2.



Slika 1 – Konstrukcija strujnog transformatora



Slika 2 – Standardni poluprovodnički ispravljački sklop

Kada se u provodniku uspostavi vremenski promenljiva struja jačine $i(t)$, u okolini provodnika se formira vremenski promenljivo magnetsko polje, opisano vektorom magnetske indukcije, $\vec{B}(t)$ ili vektorom jačine magnetskog polja, $\vec{H}(t)$, čiji intenzitet iznosi [1],

$$H(t) = \frac{i(t)}{2\pi r}, \quad (1)$$

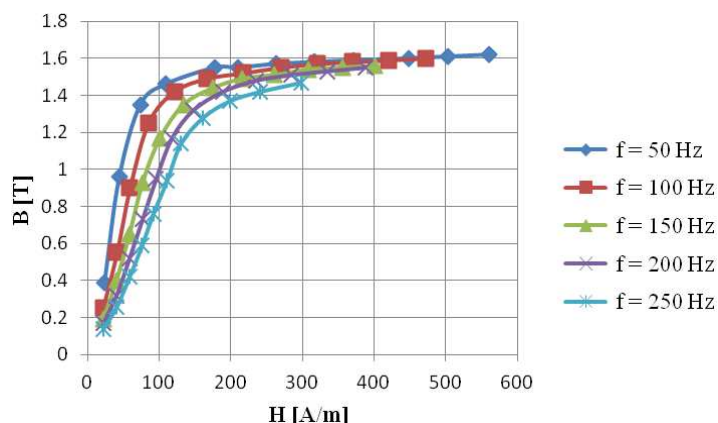
pri čemu je r rastojanje od ose provodnika. To polje postoji i u torusnom jezgru, a linije vektora jačine magnetskog polja i linije vektora magnetske indukcije su krugovi sa centrom na osi provodnika. Zbog vremenski promenljivog fluksa kroz poprečni presek torusnog jezgra, po Faradejevom zakonu, u namotajima se indukuje elektromotorna sila [1],

$$e_{ind}(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

odnosno, na priključcima se javlja vremenski promenljiv napon, koji je jednak toj elektromotornoj sili. Taj napon, u ovom slučaju, treba da zadovolji minimalne uslove, kako bi mogao da se koristi za napajanje elektronskog mernog sklopa.

Imajući u vidu konstrukciju standardnog poluprovodničkog ispravljačkog sklopa, prikazanog na slici 2, jedini uslov koji bi trebalo da ispuni napon na priključcima transformatora je da njegova maksimalna vrednost, umanjena za napon na Grecovom spoju u provodnom režimu rada, $U_d = 1,2$ V, bude veća od potrebnog napona napajanja elektronskog mernog sklopa, $U_{min} = 6$ V, pri što manjim efektivnim vrednostima jačina struja u provodniku, uz dodatni zahtev da ni pri najvećim jačinama struja u provodniku, napon ne bude viši od maksimalnog napona koji dozvoljava stabilizator napona. Kao što je već napomenuto u uvodu, taj napon je, u konkretnom slučaju, $U_m = 40$ V.

Torusno feromagnetsko jezgro je napravljeno od hladno valjanog, orijentisanog, anizotropnog materijala, koje ima komercijalnu oznaku HIPERSIL H 105 30, a normalne krive magnećenja tog materijala, kao i odgovarajuće permeabilnosti, su određene i prikazane u [2] – [9]. Familija normalnih, dinamičkih krivih magnećenja za ispitivani feromagnetski materijal jezgra, na različitim učestanostima, prikazana je na slici 3 [9].



Slika 3 – Normalne krive magnećenja transformatorskog lima HIPERSIL H 105 30

Zbog nelinearnosti feromagnetskog jezgra, čak i u slučaju kada je jačina struje u provodniku prostoperiodična, napon na priključcima transformatora će biti prostoperiodičan samo dok jezgro ne počne da ulazi u zasićenje, dok će u većem delu rada napon biti složenoperiodičan. Zbog toga nije moguće korišćenje kompleksne notacije i nije moguć tačan proračun potrebnih zavojaka transformatora.

Porastom zasićenja feromagnetskog jezgra, sinusni oblik napona se sve više deformiše u uže impulse, koji približno odgovaraju višem stepenu trigonometrijske funkcije, kao što su $\sin^2\omega t$, $\sin^3\omega t$ itd. Zbog toga je maksimalna vrednost napona, na koju se pune kondenzatori sa slike 2, veća nego što bi to bio slučaj kada bi napon bio prostoperiodičan, tako da će zaista napon na priključcima transformatora biti dovoljan za napajanje elektronskog mernog sklopa i pri manjim efektivnim vrednostima jačine struje u provodniku.

Kao što je napomenuto u uvodu, zbog svega toga će se određivanje optimalnog broja zavojaka transformatora više bazirati na izmerenim efektivnim vrednostima napona, pri različitim efektivnim vrednostima jačine struje u obuhvaćenom provodniku, nego na matematičkim proračunima.

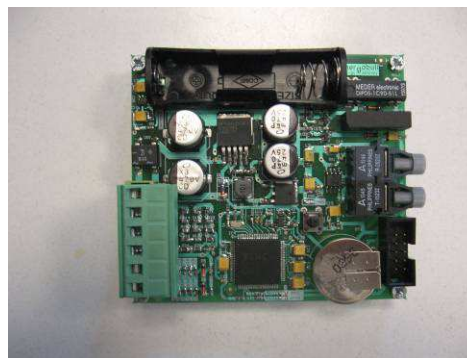
Sva merenja su izvršena na dva modela strujnog transformatora, približno istih dimenzija feromagnetskog jezgra, ali sa različitim brojevima zavojaka, u laboratoriji firme d.o.o. „Energobull“ u Novom Sadu. Rezultati svih tih merenja će biti prikazani tabelarno i grafički u nastavku ovog rada.

MODELI

Kao što je rečeno ranije, strujni transformator je u obliku torusa napravljenog od transformatorskog lima HIPERSIL H 105 30, debljine lima 0,3 mm, unutrašnjeg prečnika jezgra, $D_{un} = 45$ mm, spoljašnjeg prečnika jezgra $D_{sp} = 61$ mm i visine, $h = 20$ mm. Na jedno takvo jezgro je namotano 25, 50, 75 i 100 zavojaka, dok je na drugo jezgro namotano 100, 150 i 200 zavojaka lakirane bakarne žice CuI 0,3 mm. Fotografija drugog transformatora, prikazana je na slici 4, dok je elektronski sklop za čije napajanje je predviđen strujni transformator, zajedno sa mestom za punjivu bateriju, prikazan na slici 5.



Slika 4 – Izgled gotovog transformatora

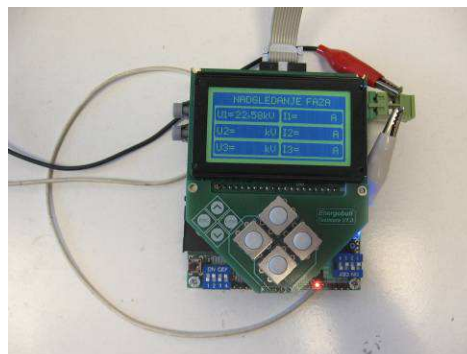


Slika 5 – Elektronski merni uređaj koji se napaja

Senzori za merenje napona i jačine struje se nalaze u sklopu potpornog izolatora, prikazanog na slici 6, dok je sklop za prikazivanje izmerenih rezultata prikazan na slici 7.



Slika 6 – Potporni izolator sa sensorima za merenje napona i jačine struje



Slika 7 – Uređaj za prikazivanje izmerenih vrednosti

Senzor za merenje jačine struje, baziran na kalemu Rogovskog, kao i gornji deo kapacitivnog delitelja, za merenje napona, nalaze se u zadebljanju na vrhu izolatora prikazanog na slici 6, dok je predviđeno da se uređaj za napajanje stavi u kutiju sličnu onoj prikazanoj na dnu slike 6, ispod konzole na koju se postavlja izolator.

Da bi rezultati merenja bili što bolja osnova za optimizaciju broja zavojaka transformatora, merenje efektivne vrednosti napona na priključcima transformatora je obavljeno u praznom hodu, kao i u slučaju nominalno opterećenog transformatora. U cilju što realnijeg merenja napona pri opterećenju, kao opterećenje je poslužio upravo merni sklop koji će u praksi biti napajan, prikazan na slici 5.

Strujni transformator je napajan iz stabilisanog izvora prostoperiodične struje konstantne jačine, koji je napravljen u firmi d.o.o. „Energobull“ u Novom Sadu, za jačine struja efektivnih vrednosti od 0 A do 100 A. Jačine struja u provodniku su merene strujnim kleštima MAXWELL MC-25 603, a napon na priključcima transformatora je meren multimetrom, UNI-T UT71C. Prilikom tih merenja je, za prikazivanje trenutnih vrednosti napona, korišćen digitalni osciloskop sa efektom pamćenja, TEKTRONIX TDS 5032.

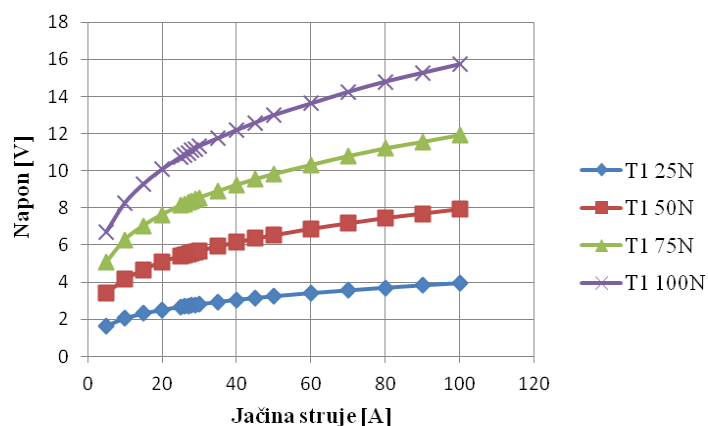
REZULTATI

Izmerene efektivne vrednosti napona, bez opterećenja, sa različitim brojevima zavojaka, prikazane su u Tabeli 1.

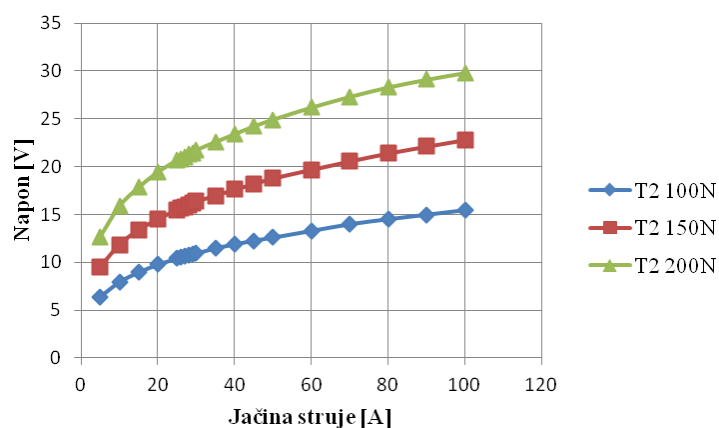
TABELA 1 – IZMERENE EFEKTIVNE VREDNOSTI NAPONA U PRAZONOM HODU

I [A]	TORUS 1				TORUS 2		
	$N = 25$ zav.	$N = 50$ zav.	$N = 75$ zav.	$N = 100$ zav.	$N = 100$ zav.	$N = 150$ zav.	$N = 200$ zav.
5	1,662	3,41	5,067	6,712	6,4	9,469	12,632
10	2,069	4,154	6,28	8,277	7,941	11,816	15,853
15	2,326	4,669	7,047	9,295	8,959	13,366	17,828
20	2,519	5,104	7,64	10,09	9,76	14,506	19,432
25	2,682	5,405	8,135	10,753	10,399	15,466	20,675
26	2,71	5,455	8,217	10,844	10,528	15,669	20,838
27	2,738	5,509	8,298	10,965	10,633	15,804	21,014
28	2,769	5,564	8,371	11,113	10,74	15,962	21,294
29	2,792	5,617	8,459	11,182	10,831	16,155	21,462
30	2,82	5,689	8,555	11,335	10,934	16,354	21,733
35	2,941	5,922	8,891	11,754	11,468	16,97	22,589
40	3,057	6,145	9,235	12,192	11,888	17,608	23,409
45	3,148	6,349	9,534	12,59	12,263	18,18	24,218
50	3,245	6,525	9,809	12,997	12,596	18,773	24,921
60	3,412	6,87	10,3	13,622	13,285	19,686	26,192
70	3,555	7,164	10,777	14,247	13,985	20,568	27,309
80	3,695	7,452	11,197	14,799	14,506	21,407	28,299
90	3,824	7,693	11,54	15,271	14,975	22,119	29,106
100	3,939	7,931	11,905	15,732	15,448	22,814	29,8

Grafički prikaz rezultata prikazanih u prvom delu Tabele 1, za prvi transformator, u praznom hodu, označen u tabeli kao torus 1, dat je na slici 8, dok je prikaz rezultata merenja na drugom transformatoru dat na slici 9.



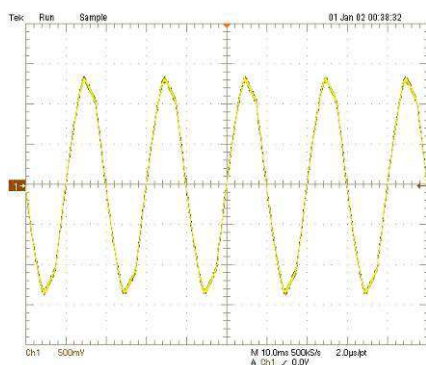
Slika 8 – Naponi na prvom transformatoru u praznom hodu



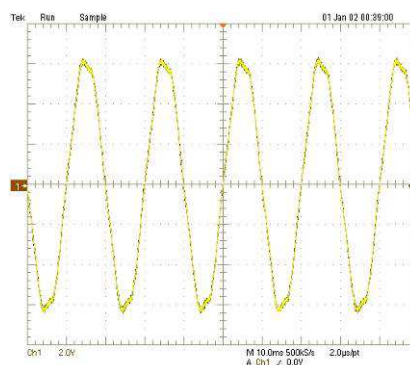
Slika 9 – Naponi na drugom transformatoru u praznom hodu

Na slici 8 može da se uoči da su naponi na priključcima transformatora sa 25 zavojaka, odnosno, 50 zavojaka, nedovoljni za napajanje elektronskog mernog sklopa ($U_{T1\ 25N}$, $U_{T1\ 50N} < 6\text{ V}$). U svim ostalim slučajevima bi napon transformatora u praznom hodu bio dovoljan za zadovoljavanje oba postavljena uslova.

Primeri trenutnih vrednosti napona pri različitim jačinama struja, snimljeni digitalnim osciloskopom, dati su na slici 10, za drugi transformator, sa 100 zavojaka, za jačine struja 0,2 A i 5 A, dok su isti dijagrami za efektivne vrednosti jačina struja u provodniku, $I = 10\text{ A}$ i $I = 50\text{ A}$ dati na slici 11.

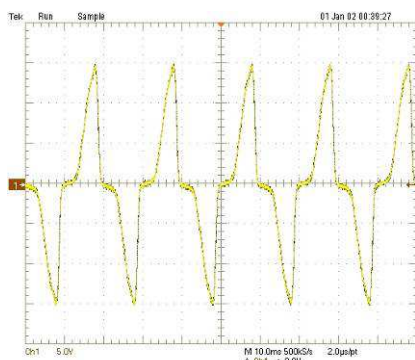


a)

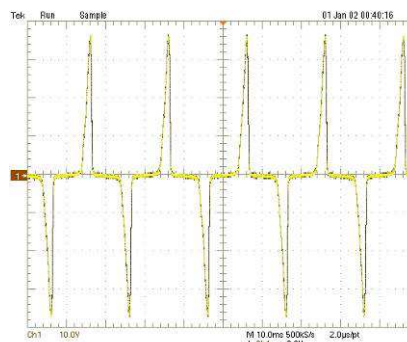


b)

Slika 10 – Trenutne vrednosti napona pri efektivnim vrednostima jačina struja a) $I = 0,5\text{ A}$ i b) $I = 2\text{ A}$



a)



b)

Slika 11 – Trenutne vrednosti napona pri efektivnim vrednostima jačina struja a) $I = 10\text{ A}$ i b) $I = 50\text{ A}$

Na slici 10 već može da se uoči blago nastupanje zasićenja feromagnetskog materijala, a slika 11 pokazuje da je pri većim jačinama struja, to zasićenje izrazito. Istovremeno, vremenski oblici napona prikazani na slici 11 pokazuju i tipičnu složenoperiodičnu funkciju, čija maksimalna vrednost nije $\sqrt{2}$ puta veća od njene efektivne vrednosti, već je odnos amplitude i efektivne vrednosti mnogo veći. To znači da će, u slučajevima izrazitog zasićenja feromagnetskog materijala, napon dovoljan za napajanje elektronskog mernog sklopa nastupiti pri nižim efektivnim vrednostima napona, ali i da će, pri opterećenju, taj jednosmeran napon biti više talasast nego što bi bio pri prostoperiodičnom naponu na priključcima transformatora.

Izmerene efektivne vrednosti napona na priključcima transformatora, sa opterećenjem, pri različitom broju zavojaka, prikazane su u Tabeli 2.

TABELA 2 – IZMERENE EFEKTIVNE VREDNOSTI NAPONA SA NOMINALNIM OPTEREĆENJEM

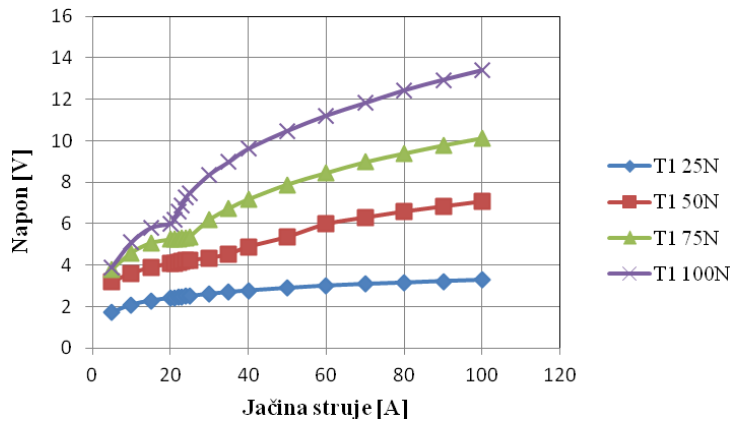
I [A]	TORUS 1				TORUS 2		
	N = 25 zav.	N = 50 zav.	N = 75 zav.	N = 100 zav.	N = 100 zav.	N = 150 zav.	N = 200 zav.
5	1,719	3,175	3,785	3,906	3,857	4,023	3,5287
10	2,086	3,590	4,588	5,097	4,836	4,999	4,286
15	2,283	3,871	5,061	5,803	5,559	5,788	4,776
20	2,407	4,075	5,236	6,004	5,789	6,397	5,367
21	2,427	4,103	5,257	6,201	5,835	6,451	5,465
22	2,448	4,137	5,279	6,589	6,068	6,529	5,596
23	2,461	4,179	5,291	6,889	6,512	11,307	5,735
24	2,487	4,205	5,321	7,258	6,904	11,607	5,859
25	2,503	4,234	5,374	7,480	7,220	11,846	6,006
30	2,608	4,338	6,179	8,357	8,610	12,923	15,889
35	2,690	4,526	6,724	8,969	9,269	13,663	17,964
40	2,767	4,873	7,166	9,603	9,744	14,497	18,958
50	2,886	5,359	7,884	10,467	10,569	15,639	20,449
60	3,000	5,978	8,442	11,207	11,233	16,631	21,747
70	3,079	6,299	8,964	11,812	11,842	17,497	22,784
80	3,141	6,590	9,382	12,423	12,391	18,335	23,517
90	3,196	6,838	9,771	12,928	12,877	19,025	23,918
100	3,271	7,077	10,117	13,390	13,344	19,665	24,227

Kao što je već rečeno, kao opterećenje je poslužio upravo elektronski merni sklop, koji će biti napajan pomoću strujnog transformatora, tako da je Tabela 2 primerenija za ocenu optimalnog broja zavojaka.

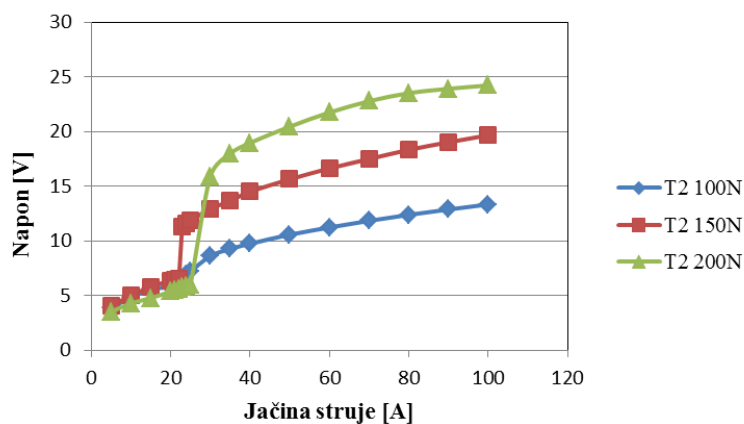
Kao i u Tabeli 1, i u Tabeli 2 mogu da se uoče razlike između izmerenih vrednosti napona na dva transformatora sa istim brojem zavojaka, $N = 100$ zavojaka, što znači da jezgra transformatora ipak nisu bila identična.

Kako elektronski sklop za napajanje ima u sebi punjivu bateriju, u Tabeli 2 su osenčena polja sa vrednostima napona pri kojima se menja režim napajanja; do osenčenih vrednosti se elektronski merni sklop napaja iz baterije, dok od markirane vrednosti napajanje preuzima strujni transformator.

Grafički prikaz rezultata prikazanih u prvom delu Tabele 2, za prvi transformator sa nominalnim opterećenjem, dat je na slici 12, dok je prikaz rezultata merenja na drugom transformatoru dat na slici 13.



Slika 12 – Naponi na prvom transformatoru sa nominalnim opterećenjem



Slika 13 – Naponi na drugom transformatoru sa nominalnim opterećenjem

Na dijagramima sa slika 12 i 13 se vidi skokovit porast napona pri efektivnim vrednostima oko 20 V, što je posledica režima napajanja elektronskog mernog sklopa. Skok vrednosti napona nastaje usled isključenja napajanja pomoću punjive baterije i početka punjenja baterije, odnosno, napajanje elektronskog mernog sklopa preuzima ispravljen, stabilisan napon sa priključaka strujnog transformatora.

Vremenski oblici napona u zavisnosti od jačine struje u provodniku, su veoma slični vremenskim oblicima napona na priključcima transformatora u praznom hodu, prikazanim na slikama 10 i 11, pa neće biti prikazani na ovom mestu.

Na osnovu svih prethodnih razmatranja i svih prikazanih rezultata, može da se zaključi sledeće:

- Za transformatorsko jezgro obeleženo sa T1, ni 25 zavojaka ni 50 zavojaka nisu dovoljni da se i pri malim jačinama struja ostvare naponi dovoljni za napajanje elektronskog mernog sklopa.
- Namotaj sa 75 zavojaka je na granici rentabilnosti, jer se i kod njega dovoljan napon ostvaruje tek na većim jačinama struja u provodniku.
- U svim ostalim slučajevima je postignut uslov da se potreban napon postiže već pri malim jačinama struja u provodniku.
- Transformatori sa 150 zavojaka i 200 zavojaka potrebne napone zaista dostižu pri malim jačinama struja u provodniku, ali su indukovane elektromotorne sile indukovane na priključcima transformatora, pri većim jačinama struja, relativno visoke, što dovodi do značajnijih gubitaka u elektronskom stabilizatoru napona za napajanje.
- Prema tome, za dato jezgro su najbolji rezultati ostvareni sa namotajem od 100 zavojaka. U tom slučaju se potreban napon dostiže na približno istim jačinama struja kao u slučajevima većeg broja zavojaka, uz istovremeno manji maksimalni napon pri najvećim jačinama struja u provodniku. To znači i da će gubici u stabilizatoru napona za napajanje elektronskog mernog sklopa biti najmanji.

ZAKLJUČAK

U ovome radu je pokazano da strujni transformator veoma efikasno može da se koristi za napajanje elektronskog mernog sklopa. Pokazano je da zasićenje feromagnetskog jezgra može da se iskoristi za delimičnu stabilizaciju napona na priključcima namotaja strujnog transformatora, pri čemu složenoperiodičan vremenski oblik tog napona zbog nelinearnosti i zasićenja feromagnetskog jezgra ne smeta pri takvoj nameni transformatora. Štaviše, takav vremenski oblik napona pomaže da napajanje elektronskog mernog sklopa bude još efikasnije.

U radu su prikazana ispitivanja dva slična strujna transformatora, sa torusnim jezgrom od magnetski mekog materijala, uske histerezisne petlje, na koje je namotan namotaj sa više otepa. Izmerene su efektivne vrednosti napona na priključcima transformatora, pri različitim brojevima zavojaka i različitim jačinama struja u provodniku koji je obuhvaćen strujnim transformatorom. Na osnovu tih merenja je zaključeno koji broj zavojaka najbolje zadovoljava prethodno definisane uslove efikasnosti rada strujnog transformatora u ovom slučaju.

Zaključeno je da se optimalni rezultati dobijaju na izabranom transformatoru na koji je namotano 100 zavojaka. U tom slučaju je na priključcima transformatora ostvaren dovoljan napon napajanja već pri manjim jačinama struja, što znači da je transformator u stanju da napaja elektronski merni sklop u širokom opsegu jačina struja u faznom, distributivnom provodniku. S druge strane, takav broj zavojaka prouzrokuje najmanje gubitke u elektronskom stabilizatoru napona napajanja.

ZAHVALNICA

Rad predstavlja deo istraživanja na projektu broj TR32055, finansiranim od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije, 2011-2016.

Zahvaljujemo se operatoru distributivnog sistema "EPS Distribucija" d.o.o Beograd na finansijskoj pomoći za učešće i izlaganje rada na 10. Savetovanju o elektrodistributivnim mrežama Srbije, "CIRED 2016" u Vrnjačkoj Banji.

LITERATURA

1. Popović B., 1981, "Osnovi elektrotehnike 2", Građevinska knjiga, str. 53, 71 i 141.
2. Della Torre E., "Magnetic Hysteresis", IEEE Press, New York, 1999.
3. Polik Z., Kuczmann M., "Measuring and Control the Hysteresis Loop by Using Analog and Digital Integrators" Journal of optoelectronics and advanced materials, vol. 10, No7, pp. 1861–1865, July 2008.
4. Anderson J., Blotzer R., "Permeability and Hysteresis Measurement", The Measurement, Instrumentation and Sensors, Handbook, Chapter VII/49, Boca Raton, FL, USA, CRC Pres with IEEE Press, 1999, pp 49-57.
5. Herceg D, Prša M., Kasaš-Lažetić K., Oglejan R.T., "Magnetic characteristics of ferromagnetic shielding material", XVII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2012, Bourgas, Bulgaria, 28-30 May 2012, Proceedings Vol. 1, pp.139-146.
6. Kasaš-Lažetić K., Herceg D., Đurić N., Prša M., "Measuring frequency dependent magnetic anisotropy of ferromagnetic material", 17th International symposium on power electronics – Ee 2013, Novi Sad, Srbija, October 30th – November 1st, 2013, Paper, No. T.4.4, pp. 1-4.
7. Herceg D., Kasaš-Lažetić K., Kljajić D., Mučalica N., Prša M., "Frekvencijski zavisne permeabilnosti pocinkovanog gvozdene lima", XIII Međunarodni naučno-stručni simpozijum Infoteh-Jahorina 2014, Jahorina, 19-21. mart 2014, Vol 13. Ref ENS 1.9 pp. 165-168.
<http://www.infoteh.rs.ba/rad/2013/ENS-2/ENS-2-5.pdf>
8. Kasaš-Lažetić K., Herceg D., Poznić A., Župunski I. and Prša M., "Some experiences in initial magnetization curve measurement", ПЕС 2015, Niš, Serbia, Aug. 31 – Sep. 2, 2015. Session O2 05 pp. 1-4.
9. Herceg D., Kasaš-Lažetić K., Bajović V., Prša M., "Measurements of all three magnetisation curves", 18th International symposium on power electronics – Ee 2015, Ee 2015, Novi Sad, Srbija, October 28-30, 2015, Paper No. T4.2-3, pp. 1-4.

¹E-mail: kkasas@uns.ac.rs, ²E-mail: vuletic@uns.ac.rs, ³E-mail: npsmaili@gmail.com,

⁴E-mail: tomislav.papic@epsdistribucija.rs, ⁵E-mail : prsa@uns.ac.rs