

Nina Meško, dipl.ing.el.
Končar-Distributivni i specijalni transformatori d.d.
nina.mesko@koncar-dst.hr

Renato Čučić, dipl.ing.el.
HEP ODS d.o.o.
renato.cucic@hep.hr

Slaven Tojić, mag.ing.el.
Končar-Distributivni i specijalni transformatori d.d.
slaven.tojic@koncar-dst.hr

Ivan Dundović, dipl.ing.el.
HEP ODS d.o.o.
ivan.dundovic@hep.hr

AMORFNI DISTRIBUTIVNI TRANSFORMATORI

SAŽETAK

U skladu s Europskom direktivom o eko dizajnu proizvoda povezanih s energijom i Uredbom br. 548/2014 kojom se propisuju maksimalni dozvoljeni gubici transformatora, donesen je novi standard EN 50588-1:2015 koji definira po tri razine gubitaka tereta i praznog hoda. Dvije od tri razine gubitaka praznog hoda moguće je zadovoljiti korištenjem klasičnog magnetski orijentiranog lima, ali najnižu razinu AAAo moguće je postići isključivo korištenjem amornog materijala u jezgri.

U ovom radu prikazan je proces proizvodnje i rezultati ispitivanja amornih distributivnih transformatora u Končar D&ST-u.

Ključne riječi: amorfni distributivni transformator, gubici praznog hoda

AMORPHOUS DISTRIBUTION TRANSFORMERS

SUMMARY

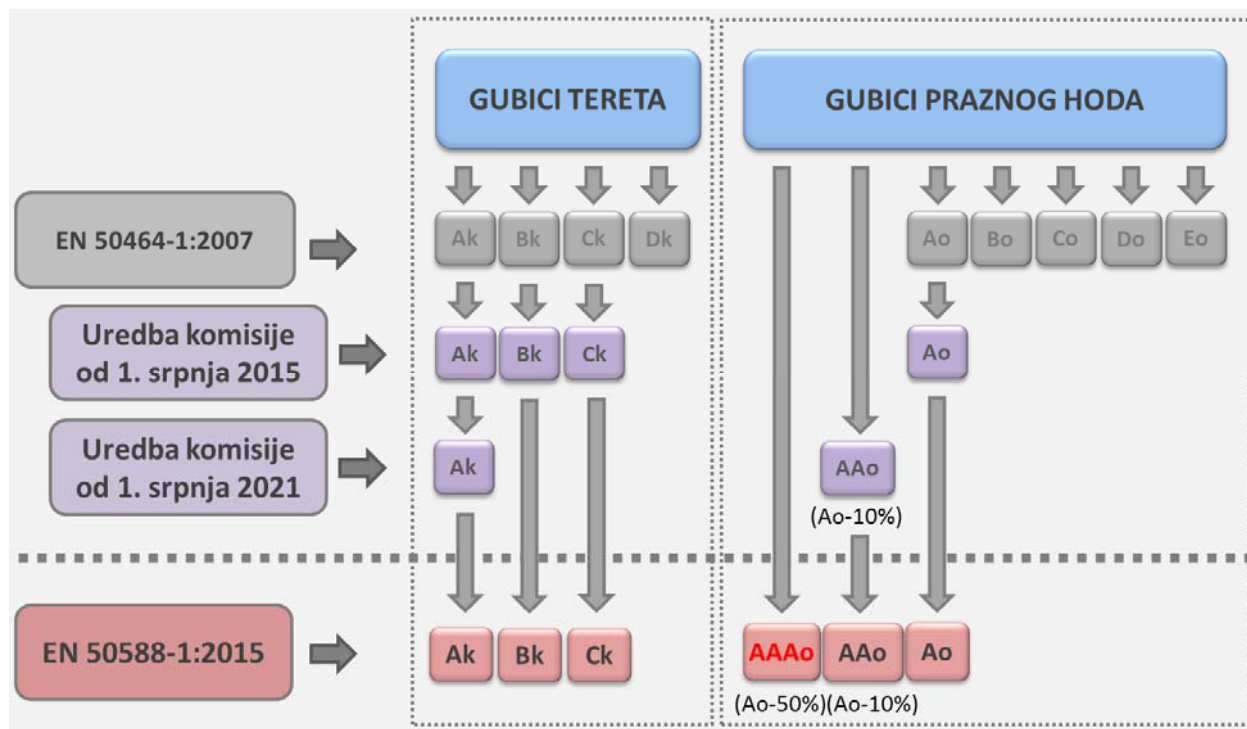
In compliance with European Eco design Directive for energy-related products and Commission Regulation No 548/2014 which defines maximum permissible levels of load and no-load losses, new standard EN 50588-1:2015 has been issued. It defines three levels of load losses and three levels of no-load losses. Two out of three no-load loss levels can be achieved by using the grain oriented electrical steel but the third lowest level can only be met by using amorphous material.

In this paper the production and the test results of amorphous distribution transformers in Končar D&ST are given.

Key words: amorphous distribution transformer, no-load loss

1. UVOD

Potaknuta sve većom važnosti energetske učinkovitosti i zaštite okoliša, Europska Unija je 2009. godine donijela Europsku direktivu o eko dizajnu proizvoda povezanih s energijom [1], koja se među ostalim odnosi i na distributivne transformatore. Vezano za navedenu direktivu, 2014. godine donesena je Uredba br. 548/2014 kojom se propisuju maksimalni dozvoljeni gubici transformatora [2]. U odnosu na do tada važeći standard EN 50464-1:2007 [3], nova Uredba značajno reducira najveće dozvoljene razine gubitaka, posebice gubitaka praznog hoda. Naime, standard EN 50464-1 definira 4 razine gubitaka tereta Ak, Bk, Ck i Dk, te 5 razina gubitaka praznog hoda Ao, Bo, Co, Do i Eo gdje su slovom A označene najniže, a slovima D, odnosno E najviše razine. Prema Uredbi je najveća dozvoljena vrijednost gubitaka praznog hoda snižena na Ao počevši od 1.7.2015., odnosno na Ao-10% (AAo) počevši od 1.7.2021. Uredbu po gubicima slijedi i novi standard za distributivne transformatore EN 50588-1:2015 [4] u kojem je dodatno uvedena razina AAAo (Ao-50%). Sve navedeno prikazano je na slici 1.



Slika 1. Razine gubitaka distributivnih transformatora do 3150 kVA

Uspoređujući definirane dozvoljene razine gubitaka u prema novom [4] i starom [3] standardu vidljivo je da je naglasak bio na smanjenju gubitaka praznog hoda Po i da su oni znatno više smanjeni nego gubici tereta Pt. Jedan od razloga tome je svakako činjenica da je prosječni faktor opterećenja distributivnih transformatora oko 20 % [5], pa gubici praznog hoda (koji postoje dok god je transformator pod naponom) imaju veću težinu od gubitaka tereta u ukupnim gubicima transformatora [6]. Drugi razlog većeg smanjenja gubitaka Po u odnosu na gubitke Pt je što se smanjenje gubitaka praznog hoda do određene razine u osnovi ostvaruje primjenom kvalitetnijeg materijala u jezgri, bez utjecaja na dimenzije i težinu transformatora. S druge strane smanjenje gubitaka tereta najčešće se postiže povećanjem presjeka vodiča što dovodi do povećanja težine i dimenzija transformatora.

U postojećoj klasičnoj tehnologiji izrade transformatora u kojoj se jezgra radi od magnetski orijentiranog lima moguće je postići razinu gubitaka Ak/AAo. Najnižu razinu gubitaka praznog hoda AAAo danas je moguće postići jedino korištenjem amorfnog materijala za jezgru. Distributivni transformatori s jezgrom napravljenom od amorfnog materijala prirodno postižu te gubitke. S druge strane takvi transformatori su zbog niže indukcije zasićenja teži i većih dimenzija od klasičnih distributivnih transformatora, ali uz nižu razinu gubitaka praznog hoda. Također se kod njih ne mogu ni približno postići niske vrijednosti buke kao kod klasičnih distributivnih transformatora. To potvrđuje i opaska u novom standardu EN 50588-1 [4] u kojem se za razinu gubitaka AAAo (koja se ne može ostvariti u klasičnoj tehnologiji) navodi da se vrijednost za buku tj. za zvučnu snagu Lwa dogovara direktno između kupca i

proizvođača transformatora. Za ostale razine gubitaka praznog hoda (AAo i Ao) koje se mogu postići u klasičnoj tehnologiji navodi se granična vrijednost Lwa (tablica I).

Tablica I. Dozvoljene razine gubitaka praznog hoda Po i zvučne snage Lwa prema novom standardu EN 50588-1 (ovdje su prikazane snage do uključivo 250 kVA)

<i>Nazivna snaga</i>	<i>AAo</i>	<i>AAo</i>	<i>Lwa</i>	<i>Ao</i>	<i>Lwa</i>
kVA	W	W	dB(A)	W	dB(A)
≤ 25	35	63	36	70	37
50	45	81	38	90	39
100	75	130	40	145	41
160	105	189	43	210	44
250	150	270	46	300	47

Amorfni transformatori u svjetskim okvirima zauzimaju oko 5 % tržišta distributivnih transformatora [7] i to prvenstveno u zemljama s frekvencijom 60 Hz (32 % veći Po nego na 50 Hz), motanom tehnologijom izrade jezgara te jednofaznim transformatorima. U europskim okvirima amorfni transformatori nisu uobičajeni. U ovom članku dana su iskustva Končar D&ST-a s proizvodnjom takvih transformatora, a daljnjim praćenjem u eksploataciji steći će se i korisna pogonska iskustva.

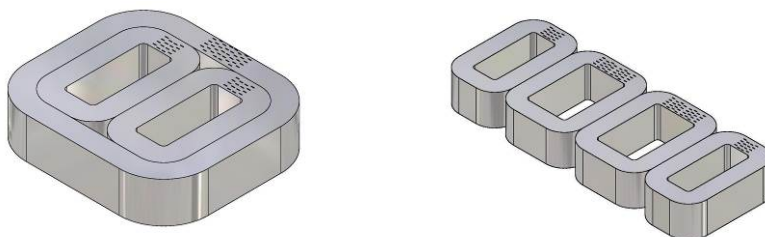
2. AMORFNI DISTRIBUTIVNI TRANSFORMATORI

2.1. Karakteristike amornog materijala

Za razliku od magnetski orijentiranog lima koji ima kristalnu strukturu i ravnomjerno raspoređene atome s ponavljajućim uzorcima, amorfni materijal je metalna legura sa nekristalnom strukturom, tj. nasumičnom raspodjelom atoma. Navedenu metalnu leguru karakteriziraju vrlo niski specifični gubici, niža indukcija zasićenja i veća specifična cijena u odnosu na magnetski orijentirani lim.

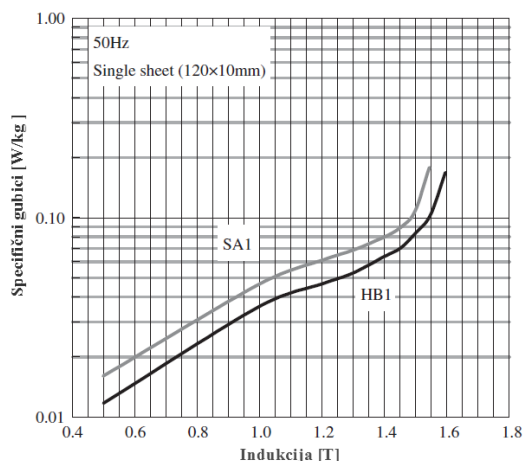
Proizvodni proces amornog materijala je vrlo kompleksan. Postupak proizvodnje temelji se na otapanju legure željeza, bora i silicija te zatim naglom hlađenju iste kako bi se spriječila kristalizacija. Hlađenjem se dobivaju dugačke, uske trake amornog materijala širine 142, 170 ili 213 mm i debljine 0,025 mm, što amorfni materijal čini oko 10 puta tanjim od magnetski orijentiranog lima. Zbog manje debljine, manji su i gubici vrtložnih struja. Zbog toga su i specifični gubici amornog materijala oko 3 puta manji od specifičnih gubitaka magnetski orijentiranog lima pri istoj indukciji. Manja debljina pridonosi i slabijoj iskoristivosti amornog materijala pa je tipični faktor slaganja (omjer neto i bruto presjeka jezgre) oko 80 %, dok je isti faktor za magnetski orijentirane limove veći od 95 %. Distributivni transformatori s jezgrama od amornog materijala imaju za oko 50-70 % niže gubitke praznog hoda od klasičnih transformatora, čime se eventualni zahtjev za gubicima razine Ao-50% može lako ispuniti.

Amorfne jezgre su motane iz trake jedne širine iz čega slijedi da je presjek amornih jezgri pravokutan. Za trofazne transformatore rade se u dvije varijante: trostupne i peterostupne (slika 2)



Slika 2. Trostupna i peterostupna amorfna jezgra

Za izradu amorfne jezgre koriste se dva materijala 2605SA1 (kraće SA1) i 2605HB1 (kraće HB1). Karakteristike ta dva materijala dana su na slici 3 [8].



Slika 3. Specifični gubici amornog materijala SA1 i HB1

Tipično radno područje amornih transformatora je od 1,2 T do 1,4 T za razliku od klasičnih distributivnih transformatora kod kojih je radna indukcija tipično u rasponu 1,5 T do 1,7 T.

2.2. Amorfni distributivni transformatori u Končar D&ST-u

Prvi prototipovi amornih transformatora proizvedeni su u Končar D&ST-u još 2003. godine. Proizvedeno je tri prototipa snage 100 kVA, napona 20(10)/0,42 kV, grupe spoja Yzn5 i razine gubitaka Bk/AAAO (1475/75 W). Navedeni transformatori su prošli niz serijskih i tipskih ispitivanja, između ostalog i ispitivanje na kratki spoj. U svrhu utvrđivanja stanja nakon desetogodišnjeg rada u pogonu TS Zaprešić, transformator je 2013. godine dopremljen u D&ST te ponovo ispitan. Transformator je ponovo prošao sva rutinska i tipska ispitivanja. Ispitivanja su pokazala da nema nikakvih promjena parametara transformatora (gubici, uk, ulje) u odnosu na izmjerene vrijednosti od prije 10 godina.

Zbog napretka svojstava amornog materijala, Končar D&ST je 2014. godine proizveo novih 8 prototipova amornih distributivnih transformatora. Umjesto prije korištenog 2605SA1, u novim je transformatorima korišten amorfni lim 2605HB1 s poboljšanim svojstvima (slika 3). Proizvedeno je 4 transformatora snage 100 kVA, napona 20(10)/0,42 kV, grupe spoja Yzn5 i razine gubitaka 1475/75 W (Bk/AAAO), od kojih 2 s trostupnom jezgrom i 2 s peterostupnom jezgrom, i 4 transformatora snage 250 kVA, napona 20(10)/0,42 kV, grupe spoja Dyn5 i razine gubitaka 2750/150W (Bk/AAAO), također 2 s trostupnom i 2 s peterostupnom jezgrom.

2.2.1. Proizvodnja amornih transformatora

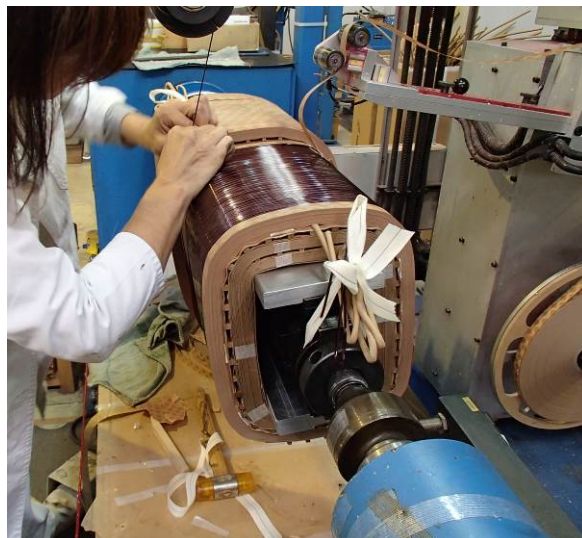
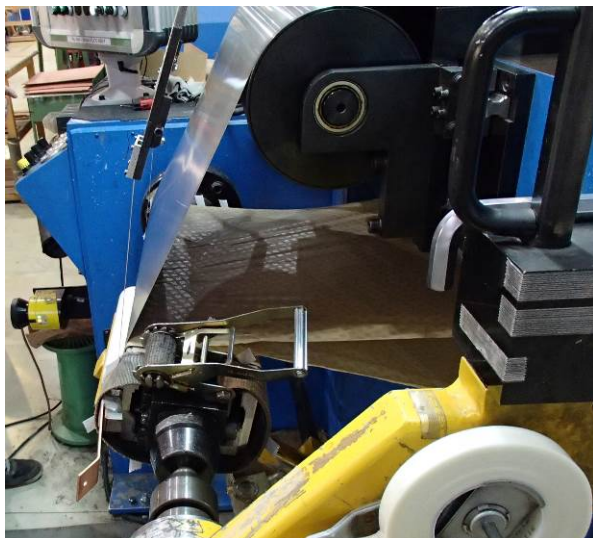
Tehnologija potrebna za izradu amornih transformatora uvelike se razlikuje od tehnologije potrebne za izradu transformatora s klasičnim magnetski orijentiranim limom. Kako je već spomenuto, amorfne jezgre su motane za razliku od klasičnih slaganih jezgara od magnetski orijentiranog lima. Također, manipulacija s amornim materijalom je otežana zbog njegovih mehaničkih karakteristika.

U tvornici Končar D&ST 2014. godine projektirano je 4 prototipa amornih distributivnih transformatora:

- 2 komada snage 100 kVA s amornom trostupnom jezgrom
- 2 komada snage 100 kVA s amornom peterostupnom jezgrom
- 2 komada snage 250 kVA s amornom trostupnom jezgrom
- 2 komada snage 250 kVA s amornom peterostupnom jezgrom

Proizvodnja započinje namatanjem niskonaponskih (NN) i visokonaponskih (VN) namota. Zbog pravokutnog presjeka amorfne jezgre i namoti su pravokutnog oblika, što je zahtjevno s tehnološkog

gledišta. Za izradu NN namota transformatora snage 100 kVA korištena je profilna žica, dok je na transformatoru snage 250 kVA korištena folija (slika 4). Za izradu VN namota korištena je okrugla lakom izolirana valjana žica (slika 4).



Slika 4. Namatanje niskonaponskog i visokonaponskog namota

Nakon izrade namota, otvaraju se jezgre i montiraju namoti. Montaža je svakako najzahtjevniji dio proizvodnje amorfnih transformatora. Montaža amornog distributivnog transformatora s trostupnom i s peterostupnom jezgrom se razlikuje, no u oba slučaja zahtjeva vrlo pažljivu manipulaciju amorfnim materijalom. Namoti se kod trostupnog transformatora stavljaju na jezgru u horizontalnom položaju, a kod peterostupnog u vertikalnom (slika 5). U oba slučaja jaram motanih jezgara sačinjen je od velikog broja tankih amorfnih limova koje je potrebno otvoriti te nakon montiranja namota ponovno zatvoriti, što je vremenski zahtjevno. Pri tome je potrebno obratiti pažnju prilikom manipulacije tankim i krtnim amorfnim limom. Nakon stavljanja namota na stupove i zatvaranja gornjeg jarma potrebno je ukliniti namote na stup, što je potrebno napraviti uz veliki oprez kako se ne bi oštetio lim jezgre.



Slika 5. Montaža trostupnog i peterostupnog amornog transformatora

Ostatak procesa proizvodnje je potpuno isti kao i kod klasičnog distributivnog transformatora. Dakle, aktivni dijelovi se suše, stavljaju u kotao, a nakon toga se transformator vakuumira i puni uljem pod vakuumom.

2.2.2. Ispitivanje amorfnih transformatora

Svih 8 komada prototipova amorfnih transformatora su prošli serijska i tipska ispitivanja. Ispitano je: prienosni omjer, grupa spoja, gubici tereta, gubici praznog hoda, napon kratkog spoja, struja magnetiziranja, strani napon, inducirani napon, zagrijanja, udarni napon i buka (slika 6).



Slika 6. Ispitivanje amorfnih transformatora u ispitnoj stanici i gluhoj komori

Rezultati ispitivanja gubitaka jezgre, buke, mase i dimenzija transformatora dani su u tablici II.

Tablica II. Usporedba prototipova amorfnih transformatora proizvedenih u Končar D&ST-u

	100 kVA 5-stupni (2003)	100 kVA 5-stupni (2014)	100 kVA 3-stupni (2014)	250 kVA 5-stupni (2014)	250 kVA 3-stupni (2014)
Nazivna snaga [kVA]	100	100	100	250	250
Razina gubitaka	Bk/AAAO	Bk/AAAO	Bk/AAAO	Bk/AAAO	Bk/AAAO
Nazivna indukcija [T]	1,22	1,38	1,37	1,38	1,37
Gubici jezgre Po [W]	69	75	69	129	123
Buka Lwa [dB]	68	59	59	60	60
Masa jezgre [kg]	313	298	281	500	450
Ukupna masa [kg]	910	829	791	1246	1186
Dimenzije d/š/v [mm]	1130/785/1370	1190/700/1335	1045/715/1490	1240/715/1560	1090/715/1695

Iz tablice II vidljivo je da su trostupne izvedbe nešto povoljnije u odnosu na peterostupne. Imaju nižu masu jezgre i transformatora te niže gubitke praznog hoda uz isti poprečni presjek jezgre i neznatno nižu indukciju. Po dimenzijama su trostupne izvedbe transformatora nešto kraće, ali više.

S druge strane je proces montaže kod trostupnih izvedbi znatno kompliciraniji zbog manipulacije s dugačkim gornjim jarmom i to u horizontalnom položaju.

Uspoređujući stari (iz 2003. godine) i novi (iz 2014. godine) prototip amorfnog transformatora snage 100 kVA u tablici II vidljiv je napredak jer su iste razine gubitaka postignute uz 100-tinjak kilograma nižu masu. Novi transformatori također imaju i nižu buku.

Amorfni transformatori i klasični distributivni transformatori ne mogu se direktno usporediti unutar iste razine gubitaka jer se s klasičnim ne može postići razina AA AO, a amorfne nema smisla koristiti za razinu AO. Ako se usporede svaki unutar svoje optimalne razine gubitaka, tada su amorfni transformatori teži, većih dimenzija i posljedično tome skuplji. Npr. tipični klasični transformator snage 100 kVA, napona 21(10,5) kV/420 V, razine gubitaka 1475/145 W (Bk/AO) ima dimenzije d/š/v 980/710/1190 mm i težinu

730 kg. Prema tablici II trostupni amorfni transformator snage 100 kVA ima dimenzije 1045/715/1490 mm i težinu 791 kg.

3. ZAKLJUČAK

Kod distributivnih transformatora najnižu razinu gubitaka AAAo, definiranu najnovijim standardom EN 50588-1:2015, danas nije moguće postići u klasičnoj tehnologiji koristeći magnetski orijentirani lim. Kao trenutačno jedino moguće rješenje za postizanje te iznimno niske razine gubitaka praznog hoda nameće se transformatorska jezgra izrađena od amornog materijala.

U Končar D&ST-u napravljeni su prototipovi amornih transformatora, prvi put 2003. godine i drugi put 2014. godine. Karakteristike amornog materijala znatno su napredovale do danas te su prototipovi iz 2014. godine bolji po pitanju težine i buke, no sama proizvodnja amornih transformatora vrlo je zahtjevna i serijska proizvodnja takvih transformatora zahtijevala bi velike promjene u postojećoj tehnologiji.

U odnosu na klasične distributivne transformatore s magnetski orijentiranim limom, amorfni transformatori su teži, većih dimenzija te imaju višu buku i veću početnu cijenu uz nižu razinu gubitaka praznog hoda.

4. LITERATURA

- [1] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products, Official Journal of the European Union, 2009, L1.
- [2] Commission Regulation (EU) No 548/2014 of 21 May 2014 on implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to small, medium and large power transformers.
- [3] EN50464-1 Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 35 kV - Part 1: General requirements, April 2007.
- [4] EN50588-1 Medium power transformers 50 Hz, with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV - Part 1: General requirements, 2015.
- [5] R. Hasegawa, D. Azuma, „Impacts of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment“, Journal of magnetism and magnetic materials, 320, 2451-2456, 2008
- [6] B. Ćučić, N. Meško, M. Mikulić, D. Trstoglavec, "Distributivni transformatori sa sniženim gubicima praznog hoda", 11. Savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, 2013.
- [7] R. Targosz, F. Topalis and W. Irrek, "Selecting energy-efficient distribution transformers: A guide for achieving least-cost solutions", SEEDT Project, 2008.
- [8] Y. Ogawa, M. Naoe, Y. Yoshizawa, R. Hasegawa, „Magnetic properties of high Bs Fe-based amorphous material“, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 304 e675-e677, 2006