

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

dr.sc. Branimir Ćucić, dipl.ing.el.
Končar distributivni i specijalni transformatori d.d.
branimir.cucic@koncar-dst.hr

POBOLJŠANJE KARAKTERISTIKA TRANSFORMATORSKIH LIMOVA

SAŽETAK

Specifični gubici magnetski orijentiranog transformatorskog lima su se u zadnjih 70-tak godina smanjili oko 3 puta. Primjena eko direktive na transformatore (od 2015.) dovela je do daljnjeg povećanja zahtjeva za smanjivanjem specifičnih gubitaka transformatorskog lima, a također i za smanjivanjem buke transformatora.

U radu je analiziran suvremeni transformatorski lim s aspekta gubitaka i buke. Najniže gubitke ima laserski obrađeni superorijentirani lim, a najnižu buku superorijentirani lim bez laserske obrade.

Ključne riječi: magnetski orijentirani transformatorski lim, gubici, buka

IMPROVEMENT OF GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL

SUMMARY

Over the last 70 years, core loss of grain oriented electrical steel has been reduced approximately 3 times. Implementation of eco-design directive on transformers (from 2015) resulted in further requests for core loss reduction, as well as the transformer noise reduction.

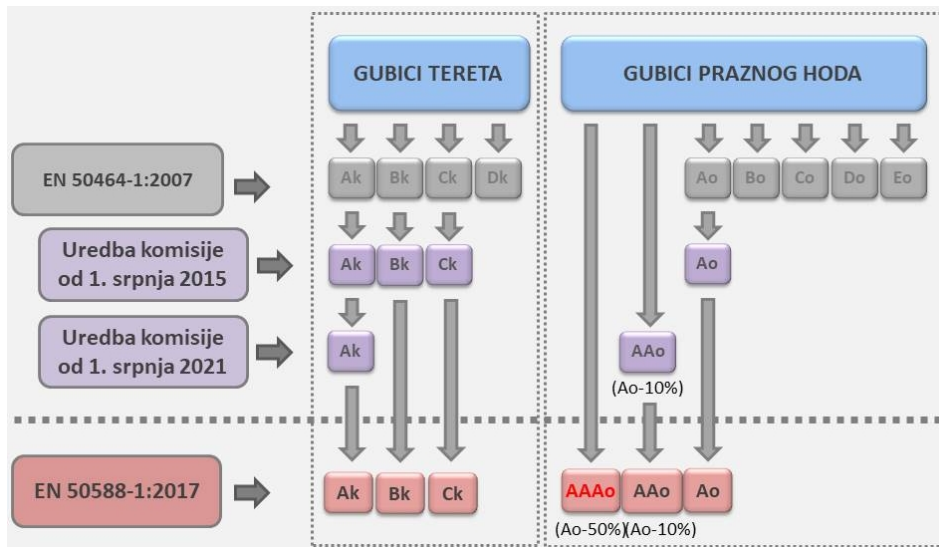
In the paper core loss and noise of state of the art grain oriented electrical steel were analysed. Domain refined high-permeability material gives lowest core loss values, while high-permeability material without laser scribing gives lowest noise.

Key words: grain oriented electrical steel, core loss, noise

1. UVOD

Razvoj transformatorskih limova je povijesno gledano oduvijek bio glavni pokretač razvoja transformatora jer niti jedan drugi materijal ili tehničko rješenje u transformatoru nije toliko unaprijeđeno kao što je to slučaj s transformatorskim limom.

Donošenjem Uredbe Komisije (EU) br. 548/2014 o provedbi Direktive 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća [1] koja propisuje minimalne zahtjeve za energetske učinkovitošću za male, srednje i velike energetske transformatore porasli su zahtjevi za transformatorskim limom sa što manjom razinom specifičnih gubitaka. Na slici 1 prikazane su dozvoljene razine gubitaka distribucijskih transformatora do uključivo 3150 kVA prema navedenoj Uredbi [1], a koje su definirane u normi EN 50588-1 [2].



Slika 1. Razine gubitaka distribucijskih transformatora do uključivo 3150 kVA [3]

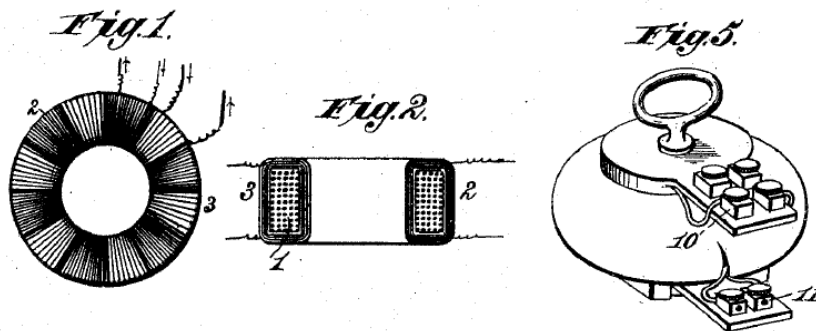
Osim niskih gubitaka, zahtjevi za niskom bukom transformatora postaju sve izraženiji. Ponekad se kod distribucijskih transformatora zahtijevaju razine buke i do nekoliko decibela niže nego to propisuje norma [2].

U radu je prikazan razvoj transformatorskog lima kroz povijest. Suvremeni transformatorski lim je analiziran sa dva najznačajnija aspekta; gubitaka i buke.

2. POVIJESNI RAZVOJ TRANSFORMATORSKOG LIMA

2.1. Povijesni razvoj materijala za jezgre

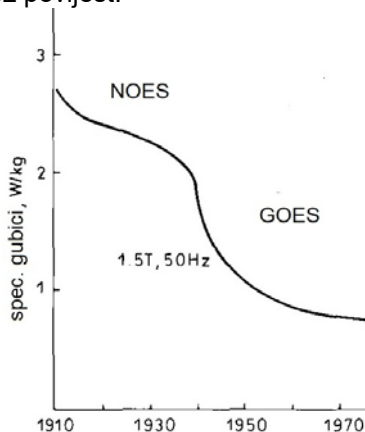
U prvim transformatorima je korištena otvorena magnetska jezgra od lijevanog željeza (štapna željezna jezgra u Jabločkovom transformatoru 1877. godine). Nedostatak koncepta otvorene jezgre (slabo ulančenje magnetskog toka i loša učinkovitost pretvorbe energije) uvelike je eliminiran uvođenjem zatvorene prstenaste jezgre načinjene od željezne žice prema slici 2 (ZBD transformator, 1885.).



Slika 2. Skice iz patentne prijave ZBD transformatora [4]

Sljedeći iskorak je primjena legura čelika s primjesom silicija (FeSi) početkom 20. stoljeća. (neorjentirani magnetski lim-NOES, eng. *non-oriented electrical steel*) Naime, silicij u leguri smanjuje vodljivost čime se smanjuju vrtložne struje, a time i gubici u jezgri. Željezo i silicij su i danas dva ključna elementa u transformatorskom limu.

Jedan od najvećih napredaka na području materijala jezgre je uvođenje magnetski orijentiranog transformatorskog lima (GOES, eng. *grain-oriented electrical steel*) i to prema patentu Normana P. Gossa iz 1934 [5]. Proizvodni proces takvog lima se sastoji od ciklusa zagrijavanja na visoku temperaturu i hladnog valjanja. GOES materijal je anizotropan, tj. ima najbolja magnetska svojstva u smjeru valjanja, odnosno znatno niže specifične gubitke od neorjentiranog lima (NOES). Na slici 3 prikazani su specifični gubici legure čelika i silicija (FeSi) kroz povijest.

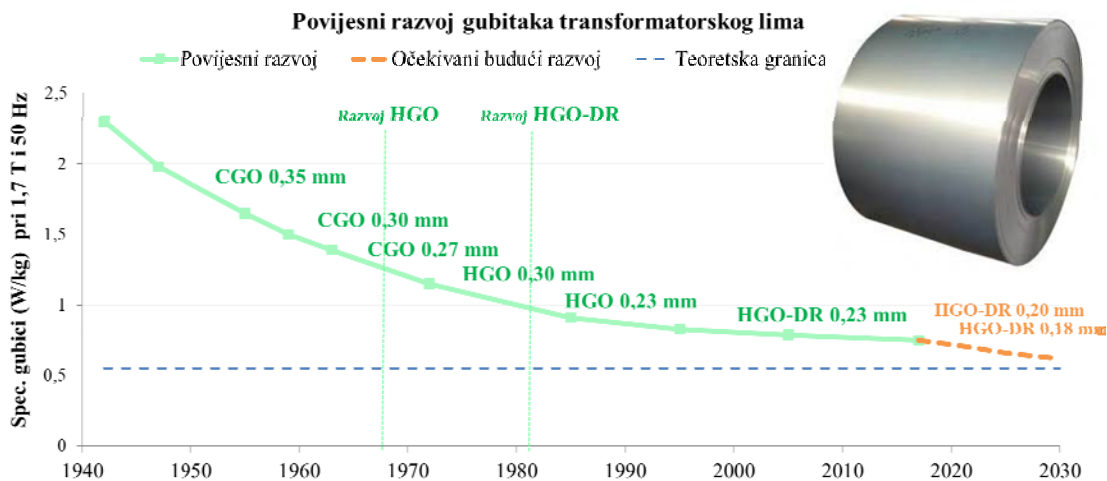


Slika 3. Povijesni razvoj legure čelika i silicija [5]

2.2. Povijesni razvoj magnetski orijentiranog lima (GOES)

Magnetski orijentirani lim se u proizvodnji transformatora masovno koristi od sredine 40-tih godina 20. stoljeća. Njegov daljnji razvoj u vidu smanjenja specifičnih gubitaka je prema slici 4 obilježavalo sljedeće:

- Smanjenje debljine lima (0,35 mm \rightarrow 0,20 mm)
- Razvoj superiorijentiranih limova (HGO, eng. *high permeability grain oriented steel*)
- Razvoj superiorijentiranih limova s laserski usitnjenim magnetskim domenama (HGO-DR, eng. *high permeability grain oriented steel - domain refined*)
- Razvoj tehnoloških procesa proizvodnje lima



Slika 4. Povijesni i očekivani budući razvoj transformatorskog lima po gubicima (GOES)

Prema slici 4 su se specifični gubici magnetski orijentiranog transformatorskog lima u zadnjih 70-tak godina smanjili oko 3 puta. Danas je u proizvodnji jezgara uobičajen laserski obrađeni superiorijentirani lim debljine 0,23 mm, a na tržištu se pojavljuju limovi s debljinom 0,20 mm.

3. VRSTE I OZNAKE TRANSFORMATORSKOG LIMA

3.1. Vrste transformatorskog lima

Prema slici 4 postoje tri glavne vrste transformatorskog lima koje se danas koriste:

- Konvencionalni lim (CGO),
- Superiorijentirani lim (HGO) i
- Laserski tretirani superiorijentirani lim (HGO-DR).

3.2. Norme za transformatorski lim

Norme koje pokrivaju transformatorski lim su:

- IEC – međunarodne norme (IEC 60404-8-7 [6], IEC 60404-1, IEC 60404-1-1, IEC 60404-2, IEC 60404-3, IEC 60404-9, IEC 60404-11, IEC 60404-13),
- EN – europska norma (HRN EN 10107 [7]),
- ASTM – američka norma (ASTM A876 – 09, ASTM A804, ASTM A343, ASTM A34, ASTM A664, ASTM A717, ASTM A719),
- JIS – japanska norma (JIS C2550 1986, JEM 1432 1988, JEM-F-3007),
- GOST – ruska norma (GOST 21427.1-83).

3.3. Označavanje transformatorskog lima prema normi

Oznaka transformatorskog lima se prema normama IEC 60404-8-7 [6] i HRN EN 10107 [7] sastoji redom od:

- | | |
|---|-----------|
| 1) slova M kao oznake magnetskog lima | M |
| 2) sto puta uvećane vrijednosti maksimalnih specifičnih gubitaka na 1,7 T i 50 Hz izražene u vatima po kilogramu za odgovarajuću nazivnu debljinu | 85 |
| 3) nazivne debljine materijala u milimetrima uvećane sto puta | 23 |
| 4) slova - S za konvencionalni orijentirani lim CGO | P |
| - P za superiorijentirani lim | |
| 5) jedne desetine frekvencije od 50 Hz. | 5 |

Tako npr. oznaka **M85-23P5** označava superiorijentirani magnetski lim debljine 0,23 mm maksimalnih specifičnih gubitaka 0,85 W/kg pri 50 Hz i 1,7 T. Iz oznake se ne vidi da li je lim laserski obrađen ili nije.

4. USPOREDBA GUBITAKA I BUKE

Računski gubici u jezgri transformatora ne dobivaju se samo množenjem specifičnih gubitaka lima i mase jezgre, već ih je potrebno uvećati za eksperimentalno dobiveni faktor kvarenja (eng. *building factor*) [8] koji proizvođači transformatora smatraju tajnim podatkom. Ipak može se reći da se on ovisno o indukciji, masi, geometriji i tipu jezgre kreće od desetak do tridesetak posto.

Računska buka jezgre transformatora još se više oslanja na eksperimentalne formule jer za procjenu buke u praznom hodu u praksi ne postoji dovoljno pouzdan parametar transformatorskog lima.

Zanimljivo je da se za isti tip transformatora i nazivno isti ulazni materijal mogu dobiti prilično različiti rezultati gubitaka i buke jezgre.

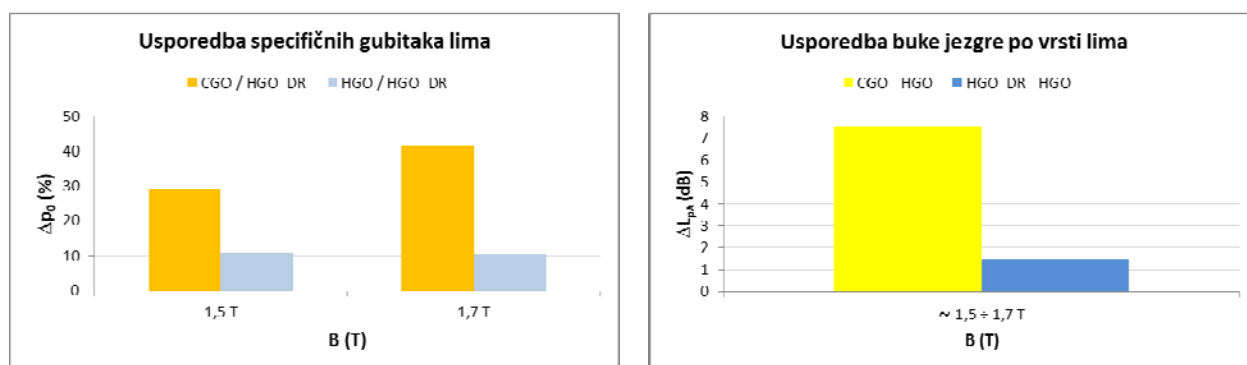
U nastavku su dane usporedbe mjerenih gubitaka i buke u praznom hodu za različite vrste i proizvođače transformatorskog lima.

4.1. Usporedba po vrstama lima

Na slici 5 prikazani su grafovi usporedbe gubitaka i buke za tri glavne vrste transformatorskog lima (CGO, HGO i HGO-DR). Usporedba je dana relativno prema limu koji dalje najbolje performanse. Najniže specifične gubitke ima laserski tretirani lim (HGO-DR), a najnižu buku superiorizirani lim bez dodatne laserske obrade (HGO).

Kod gubitaka su uspoređeni specifični gubici sve tri vrste lima iste debljine pri indukcijama 1,5 i 1,7 T. Isti odnosi približno vrijede i za gubitke jezgre (gubitke praznog hoda transformatora). Laserska obrada lima snižava gubitke za oko 10 %, dok je razlika između konvencionalnog i laserskog lima 30-tak %.

Buka jezgara uspoređena je u uobičajenom rasponu indukcija od 1,5 do 1,7 T. Napretkom u tehnologiji proizvodnje limova sve se više smanjuje utjecaj laserske obrade lima na povećanje buke (1-2 dB).



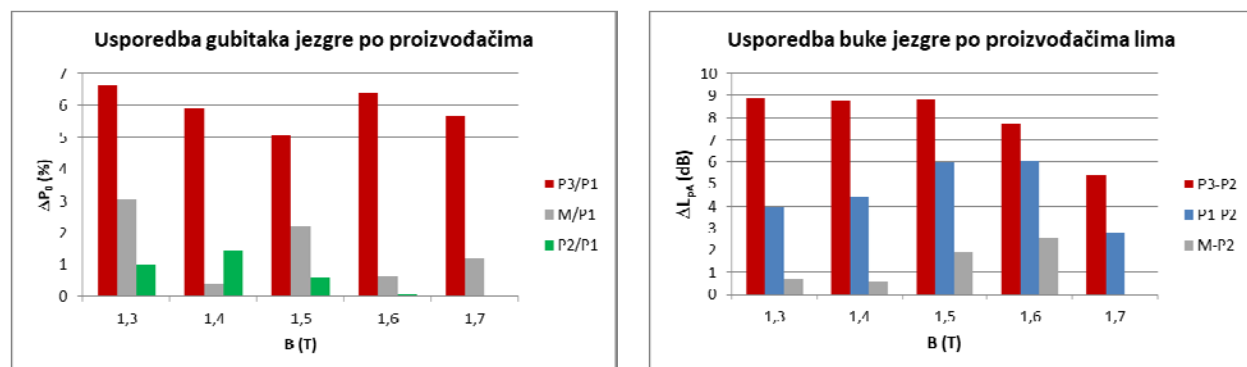
Slika 5. Usporedba gubitaka (lijevo) i buke jezgre (desno) za različite vrste transformatorskog lima

4.2. Usporedba po proizvođačima transformatorskog lima

Na slici 6 prikazana je usporedba gubitaka i buke transformatora u praznom hodu za tri različita proizvođača transformatorskog lima označena sa P1, P2 i P3. Slovom M označena je jezgra u kojoj se nalazi lim sva tri proizvođača ("miks").

Kod usporedbe gubitaka, prikazane su postotne razlike u gubicima jezgre na istom tipu transformatora, čije su jezgre napravljene od istog materijala (s istim nazivnim gubicima lima), ali s različitim proizvođača lima. Razlike u gubicima su dane relativno u odnosu na najboljeg proizvođača (P1). Prema slici 6 je vidljivo da razlike u gubicima jezgre mogu biti i veće od 6 %.

Usporedba buke prikazana je za isti tip i isti ulazni materijal. Razlike u buci su dane relativno u odnosu na najboljeg proizvođača (za buku je to P2). Prema slici 6 je vidljivo da razlike u buci jezgre mogu biti i do 9 dB.



Slika 6. Usporedba gubitaka (lijevo) i buke (desno) u praznom hodu za različite proizvođače lima

5. ZAKLJUČAK

Primjena eko direktive na transformatore dovela je do znatnog povećanja zahtjeva na transformatorski lim sa stanovišta gubitaka i buke. U radu je pokazano da najniže gubitke ima laserski obrađeni superiorijentirani lim, a najnižu buku superiorijentirani lim bez laserskog tretiranja. Također je konstatirano da gubici i buka jezgre ovise i o proizvođaču transformatorskog lima.

6. LITERATURA

- [1] 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
- [2] HRN EN 50588-1, Energetski transformatori srednjih snaga, 50 Hz, najvećeg napona opreme do 36 kV – 1. Dio: Opći zahtjevi (Medium power transformers 50 Hz, with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV - Part 1: General requirements), 2017.
- [3] N. Meško et al, "Amorfni distributivni transformatori", 5. (11.) savjetovanje HO CIRED, Osijek, 15. - 18. svibnja 2016.
- [4] K. Ziperowsky, M. Dérim, O. T. Bláthy, "Induction Coil, Patent No. 352,105", U.S. Patent Office, November 2, 1886, retrieved July 8, 2009.
- [5] A. J. Moses, "Electrical steels: past, present and future developments", IEE Proceedings, Vol. 137, Pt. A , No. 5, September 1990.
- [6] IEC 60404 Edition 3.0 Magnetic materials – Part 8-7: Specifications for individual materials – Cold rolled grain-oriented electrical steel strip and sheet delivered in the fully-processed state, svibanj 2008
- [7] HRN EN 10107 Čelična elektrotraka i elektrolim usmjerenoga zrna isporučeni u potpuno obrađenom stanju (Grain-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully processed state), listopad 2014
- [8] A. J. Moses, "Prediction of Core Losses of Three Phase Transformers from Estimation of the components Contributing to the Building Factor", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 254-255, 2003, pp. 615- 617.