

Energetski učinkoviti transformatori s amorfnom jezgrom

Prhal, Deni

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:227074>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**ENERGETSKI UČINKOVITI TRANSFORMATORI S
AMORFNOM JEZGROM**

Diplomski rad

Deni Prhal

Osijek, 2017.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 11.07.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Deni Prhal
Studij, smjer:	DEA - Elektroenergetski sustavi
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 911, 12.10.2015.
OIB studenta:	53280776813
Mentor:	Doc.dr.sc. Goran Knežević
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Danijel Topić
Naslov diplomskog rada:	Energetski učinkoviti transformatori s amorfnom jezgrom
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U diplomskom radu potrebno je dati teorijski pregled tehnologije izrade i karakteristika transformatora s amorfnom jezgrom. Nadalje, na primjeru distributivne mreže potrebno je napraviti tehno-ekonomsku analizu zamjene postojećih transformatora s transformatorima s amorfnom jezgrom.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	11.07.2017.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 14.07.2017.

Ime i prezime studenta:	Deni Prhal
Studij:	DEA - Elektroenergetski sustavi
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 911, 12.10.2015.
Ephorus podudaranje [%]:	1

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Energetski učinkoviti transformatori s amorfnom jezgrom**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Goran Knežević

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA

Ja, Deni Prhal, OIB: 53280776813, student/ica na studiju: DEA - Elektroenergetski sustavi, dajem suglasnost Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek da pohrani i javno objavi moj **diplomski rad**:

Energetski učinkoviti transformatori s amorfnom jezgrom

u javno dostupnom fakultetskom, sveučilišnom i nacionalnom repozitoriju.

Osijek, 14.07.2017.

potpis

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
1.1.	Zadatak diplomskog rada.....	2
2.	OPĆENITO O TRANSFORMATORIMA	3
2.1.	Struja magnetiziranja	5
3.	GUBICI TRANSFORMATORA	8
3.1.	Gubici u željezu	8
3.2.	Gubici u bakru	11
4.	ZAKONSKA REGULATIVA U POGLEDU ENERGETSKE UČINKOVITOSTI TRANSFORMATORA.....	13
4.1.	Minimalni zahtjevi za energetske učinkovitost	13
4.1.1.	Zahtjevi za srednje energetske transformatore (distributivni transformatori ≤ 3150 kVA) 13	
4.1.2.	Zahtjevi za srednje transformatore koji se postavljaju na stup	16
4.1.3.	Zahtjevi za srednje i velike energetske transformatore	17
4.2.	Informacije o proizvodu	20
5.	JEZGRE DISTRIBUTIVNIH TRANSFORMATORA	22
5.1.	Klasična tehnologija izrade jezgri	22
6.	AMORFNI TRANSFORMATORI.....	24
6.1.	Amorfni metali	24
6.2.	Proizvodnja amorfnih limova i montaža transformatora	25
6.3.	Karakteristike amorfnih transformatora	27
6.3.1.	Magnetska svojstva	27
6.3.2.	Tehnološka svojstva	30
6.3.3.	Električna svojstva	31
6.3.4.	Utjecaj na okoliš.....	32
6.3.5.	Ekonomski usporedba.....	33

7. SIMULACIJA U DIgSILENT PROGRAMSKOM PAKETU	40
7.1. Postavke simulacije	43
7.2. Rezultati s klasičnim distributivnim transformatorima	45
7.3. Rezultati s amorfnim distributivnim transformatorima	46
7.4. Usporedba gubitaka	47
7.4.1. Novčana ušteda	47
8. ZAKLJUČAK	50
LITERATURA	52
SAŽETAK	55
ABSTRACT	55
ŽIVOTOPIS	56

1. UVOD

Potreba za električnom energijom u svijetu sve je veća. Potrošnja i cijena električne energije stalno raste zbog čega se sve veći napori usmjeravaju prema poboljšanju energetske učinkovitosti, zaštiti okoliša i uštedi električne energije. Proizvodnja električne energije doprinosi emisiji CO₂ i ostalih stakleničkih plinova jer se većina električne energije proizvodi iz neobnovljivih izvora. Potražnja za električnom energijom najbrže je rastuća kategorija krajnje uporabe energije i predviđa se njezin porast u sljedećih 20 do 30 godina ako neće postojati politička aktivnost koja bi nastojala spriječiti taj trend [7].

Zbog krize 80-ih godina prošlog stoljeća koja je donijela i nestašicu nafte, sve se više počelo razmišljati o uštedi energije. Iako su distributivni transformatori električni uređaji koji imaju najveću korisnost, često oko 99% pri punom opterećenju, stalno su u pogonu i stvaraju značajne gubitke u mreži. Gubici u transformatoru dijele se na gubitke tereta (gubici u bakru) i gubitke praznog hoda (gubici u željezu). Gubici tereta ovise o kvadratu struje opterećenja i otporu namota, dok gubici praznog hoda postoje sve dok je transformator pod naponom bez obzira bio opterećen ili ne [10]. Distributivni transformatori prosječno su opterećeni sa svega 20% nazivne snage osim u visoko industrijaliziranim područjima. Udio gubitaka praznog hoda u ukupnim gubicima distributivnih transformatora u zemljama EU27 veći je od 70% i čine oko 25% svih tehničkih gubitaka u mreži [10, 11]. Od ukupnih gubitaka električne energije u distribucijskoj mreži HEP-a, udio tehničkih gubitaka iznosi cca 75%, a netehničkih cca 25% [12].

U 2008. godini su ukupni gubici svih instaliranih transformatora u zemljama EU27 iznosili 93.4 TWh godišnje [8]. Postoji veliki interes da su gubici smanje jer mali porast učinkovitosti može rezultirati značajnom uštedom energije zbog čega je Europska komisija donijela Uredbu u pogledu malih, srednjih i velikih transformatora kojom se propisuje znatno smanjivanje najvećih dozvoljenih razina gubitaka distributivnih i srednjih energetskih transformatora snage do 40 MVA. Ugradnjom učinkovitijih transformatora procjenjuje se da bi gubici iznosili oko 16,2 TWh godišnje u 2025., što odgovara emisiji CO₂ od 3.7 Mt [8].

U skladu s Uredbom, donesen je novi standard EN50588-1:2015 koji definira tri razine gubitaka tereta i praznog hoda. Korištenjem klasičnog magnetski orijentiranog lima za jezgru transformatora moguće je udovoljiti dvije od tri razine gubitaka praznog hoda. Najnižu razinu gubitaka praznog hoda moguće je ostvariti isključivo korištenjem amorfnog metala za jezgru transformatora [13].

Transformatori s jezgrom od amorfnog materijala posjeduju odlična magnetska svojstva i time omogućuju manje gubitke u odnosu na transformatore s klasičnim magnetsko orijentiranim limovima, nižu struju magnetiziranja, veću energetske učinkovitost i duži vijek trajanja. Gubici praznog hoda manji su 50-70% u odnosu na klasične transformatore. S druge strane, imaju veću početnu cijenu, veće dimenzije, veću buku te zbog krhkosti i savitljive strukture amorfnog metala kao i niže radne indukcije proizvodnja je ograničena na manje distributivne transformatore.

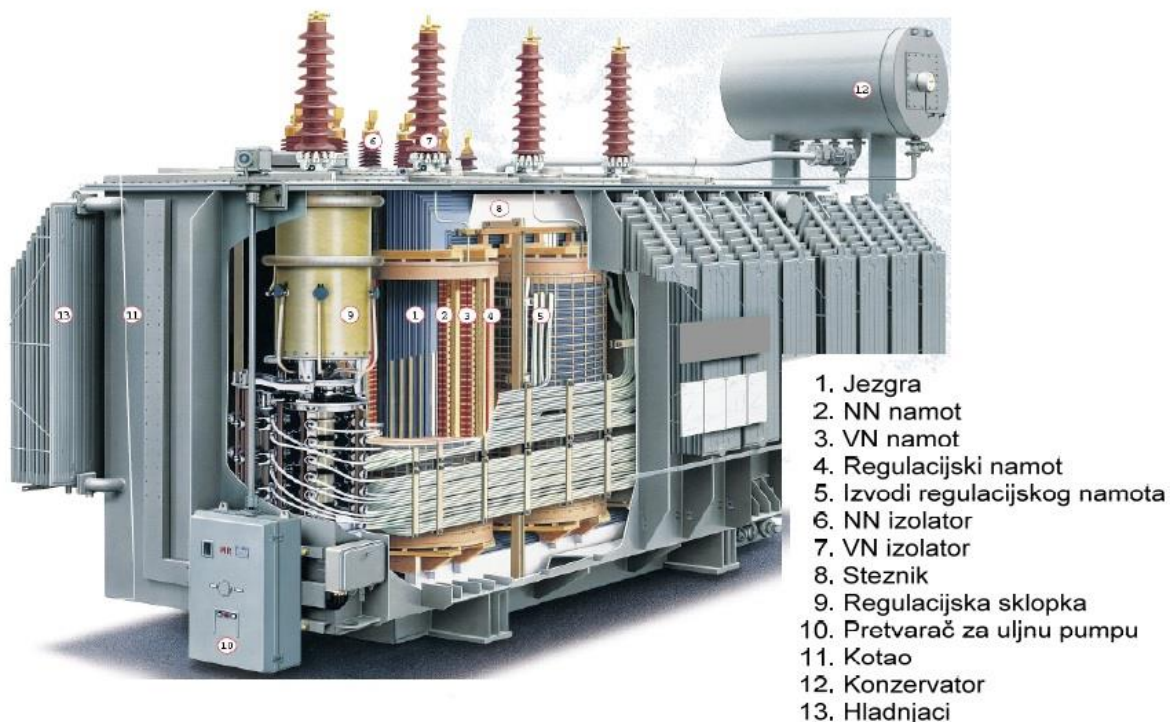
1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je teorijski obraditi gubitke transformatora i zahtjeve u pogledu energetske učinkovitosti transformatora. Nadalje, potrebno je dati teorijski pregled tehnologije izrade i karakteristika transformatora s amorfnom jezgrom te na primjeru distributivne mreže napraviti tehno-ekonomsku analizu zamjene postojećih distributivnih transformatora s transformatorima s amorfnom jezgrom.

2. OPĆENITO O TRANSFORMATORIMA

Transformator je električki uređaj koji pretvara električnu energiju iz jednog izmjeničnog sustava u drugi izmjenični sustav, promijenjenih vrijednosti napona i struja, ali iste frekvencije. Transformator je statički električni stroj jer nema pokretnih dijelova.

Rad transformatora zasniva se na principu elektromagnetske indukcije. Dijelovi koji ga sačinjavaju su željezna magnetska jezgra, dva ili više namota, izolacijski dio i razni konstrukcijski dijelovi (stezni sustav jezgre i namota, kotao, konzervator, hladnjaci, itd.). Prva dva spomenuta dijela predstavljaju aktivni dio, dok izolacijski i konstrukcijski dio ne služi direktno za transformaciju električne energije. Veza između namota je samo zajedničko elektromagnetsko polje, dok kod autotransformatora namoti mogu biti vezani i električki.



Sl. 2.1: Presjek energetskeg transformatora (>100 MVA). [1]

Obično imaju dva odvojena namota, primarni i sekundarni od kojih prvi prima električnu energiju iz generatora ili električne mreže, induktivno je prenosi na sekundarni namot i predaje priključenom trošilu ili mreži [2].

Uloga transformatora u elektroenergetskom sustavu je jako značajna jer on omogućuje ekonomičan, pouzdan i siguran prijenos i distribuciju električne energije pri najprikladnijim naponskim nivoima [3].

Primjenom transformatora rješavaju se problemi različitih naponskih razina i međusobne izoliranosti strujnih krugova koji se nalaze na različitim naponskim nivoima. Također, koriste se i pri mjerenju električnih veličina, u elektroničkim sklopovima za prijenos signala i za prilagodbu impedancije.

Gradnja transformatora i električnih strojeva temelji se na dvjema vrstama fizikalnih pojava, na električkim i magnetskim pojavama, koje usko povezuje zakon protjecanja i zakon indukcije. Nema električkih pojava bez magnetskih, niti obrnuto [4].

Svakoj točki u magnetskom polju pripada određena jakost magnetskog polja H , koja je definirana po smjeru i po iznosu. Zakon protjecanja kaže, da je integral jakosti magnetskog polja duž jedne silnice, odnosno bilo koje linije duljine „ l “, koja prolazi kroz svitak, i zatvara se oko svitka jednak sumi struja „ $\sum i$ “ odnosno sumi amperzavoja „ $i \cdot w$ “:

$$\oint H_l dl = \sum i = i \cdot w \quad [4] \quad (2-1)$$

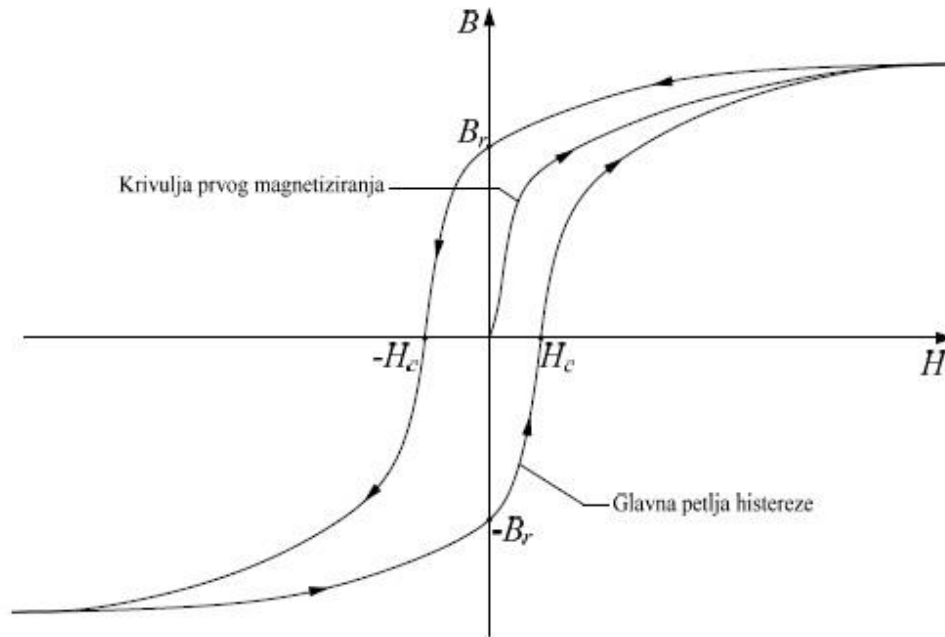
Veza između magnetske indukcije B koja predstavlja gustoću magnetskog toka i jakosti magnetskog polja glasi:

$$B = \mu \cdot H = \mu_o \cdot \mu_r \cdot H \quad [1] \quad (2-2)$$

gdje je:

- μ permeabilnost materijala,
- μ_o permeabilnost vakuuma (obično se uzima da je permeabilnost zraka jednaka permeabilnosti vakuuma - $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am),
- μ_r relativna permeabilnost kojom se uzima u obzir magnetiziranje materijala pod utjecajem narinutog magnetskog polja (za zrak vrijedi $\mu_r = 1$).

Jezgra transformatora izrađuje se od feromagnetskih materijala čija relativna permeabilnost ovisi o indukciji. $B-H$ krivuljom prvog magnetiziranja i $B-H$ krivuljom – petljom histereze dobiva se odnos između magnetske indukcije B i jakosti magnetskog polja H .



Sl. 2.2: Petlja histereze. [1]

Površina petlje histereze proporcionalna je gubicima pri izmjeničnom magnetiziranju u materijalu.

Drugi zakon na kojemu se temelji rad transformatora je Faradayev zakon indukcije. Promjenjivi magnetski tok inducira u svakom zavoju oko sebe električki napon, koji je proporcionalan brzini promjene toka:

$$e = -\frac{d\phi_t}{dt} = -w \cdot \frac{d\phi_t}{dt} = -\frac{d\psi_t}{dt} \quad [4] \quad (2-3)$$

gdje je:

- ϕ_t trenutna vrijednost toka,
- w broj zavoja,
- ψ_t ulančani magnetski tok, koji predstavlja umnožak broja zavoja i toka.

Minus (-) u jednadžbi (2-3) označava da se inducirani napon e protivi naponu koji je protjerao struju kroz vodič koja je zatim uzбудila tok.

2.1. Struja magnetiziranja

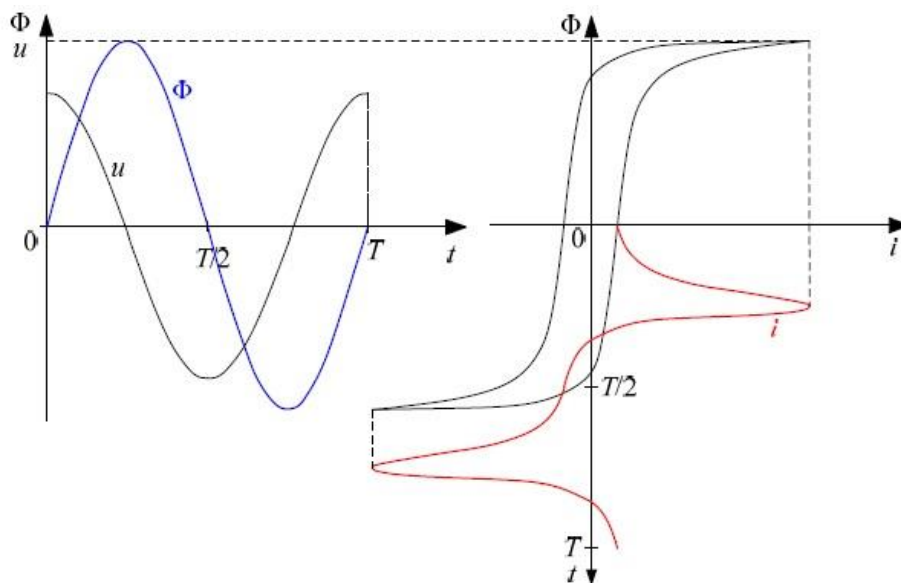
Kako bi se uzбудilo magnetsko polje u jezgri transformatora, prema zakonu protjecanja (2-1) potrebni su uzbudni amperzavoji za koje se još koristi naziv električno protjecanje (oznaka Θ). Električno protjecanje ovisi o potrebnoj veličini magnetskog toka u jezgri, geometrijskim dimenzijama jezgre i magnetskim karakteristikama limova od kojih je jezgra sačinjena.

Priključenjem transformatora na sinusni napon, u jezgri se uzbuđuje sinusni magnetski tok koji zaostaje za narinutim naponom za 90° . Indukcija se u jezgri mijenja periodički – sinusno. Takva promjena se odvija po spomenutoj petlji histereze.

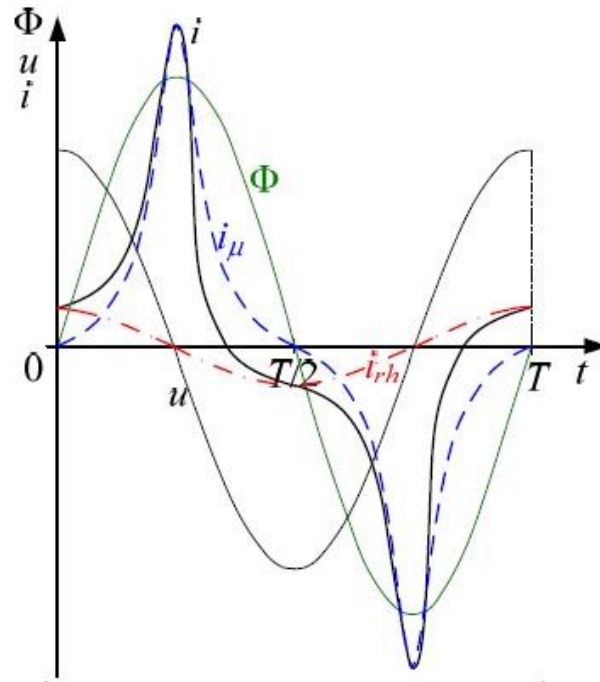
Struja magnetiziranja nije sinusna i sadrži neparne sinusne i kosinusne članove viših harmonika. Sastoji se od triju komponenti: i_μ koja se naziva čista struja magnetiziranja i čisto je jalovog karaktera jer osnovni harmonik zaostaje za naponom 90° , druge komponente i_{rh} koja nadoknađuje gubitke histereze u jezgri i treće komponente i_v koja nadoknađuje gubitke vrtložnih struja u jezgri. Osnovni harmonici druge i treće komponente u fazi su s naponom mreže i radnog su karaktera. Vrtložne struje stvaraju dodatne gubitke zato što se svojim vlastitim poljem suprotstavljaju polju koje ih je proizvelo. Nastaju uslijed izmjeničnog magnetskog polja koje se inducira u feromagnetskom materijalu zbog električne vodljivosti materijala.

Iako realni transformatori nemaju zračni raspored, postoji mala zračnost u limovima na mjestima spoja stupa i jarma što se uzima u obzir ekvivalentnim zračnim rasporedom u jezgri kojeg magnetizira jalova komponenta struje magnetiziranja.

Valni oblik struje magnetiziranja može se konstruirati prema statičkoj petlji histerezi. Magnetska indukcija proporcionalna je magnetskom toku, a struja jakosti polja, stoga se iz petlje histereze formira karakteristika tok – struja.

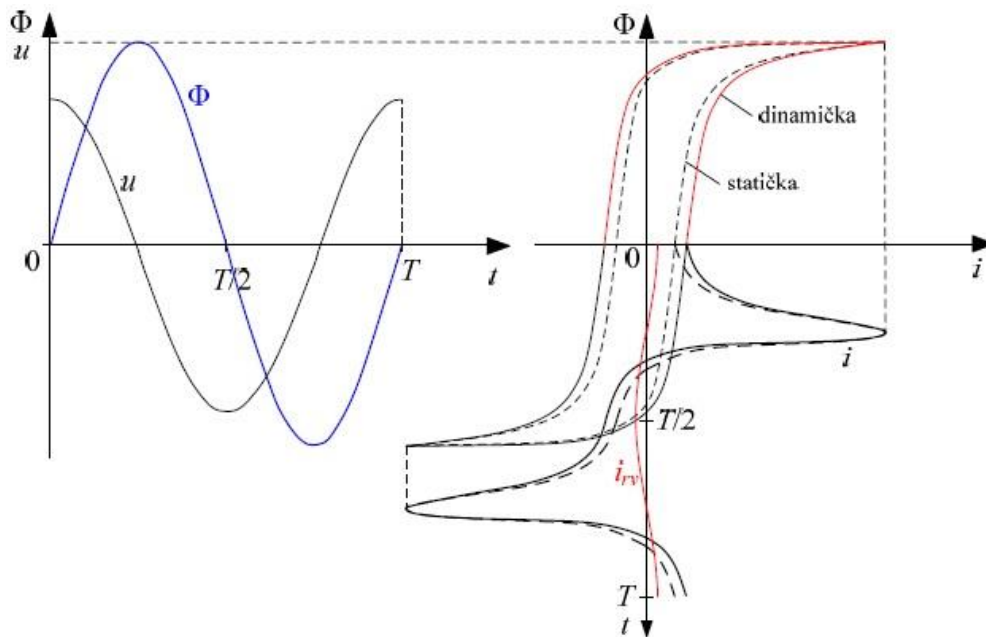


Sl. 2.3: Statička petlja histereze i valni oblik struje magnetiziranja. [1]



SI. 2.4: Rastavljanje struje magnetiziranja na radnu i jalovu komponentu. [1]

Kako bi se u obzir uzele i vrtložne struje, statička petlja histereze proširuje se na dinamičku petlju histereze.



SI. 2.5: Grafička konstrukcija za određivanje struje magnetiziranja iz dinamičke petlje histereze. [1]

Efektivna vrijednost ukupne struje magnetiziranja iznosi:

$$I_0 = \sqrt{I_{or}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{(I_{rh} + I_{rv})^2 + I_{\mu}^2} \quad (2-4)$$

3. GUBICI TRANSFORMATORA

U transformatoru postoje dvije vrste gubitaka snage i to magnetski (P_{Fe}) i električni (P_{Cu}) [5]. Magnetski gubici nastaju zbog izmjeničnog magnetskog polja i najviše se stvaraju u magnetskom krugu transformatora. U ostalim željeznim dijelovima nastaje veoma mali dio magnetskih gubitaka koji se zanemaruje, najčešće zbog rasipnih magnetskih tokova.

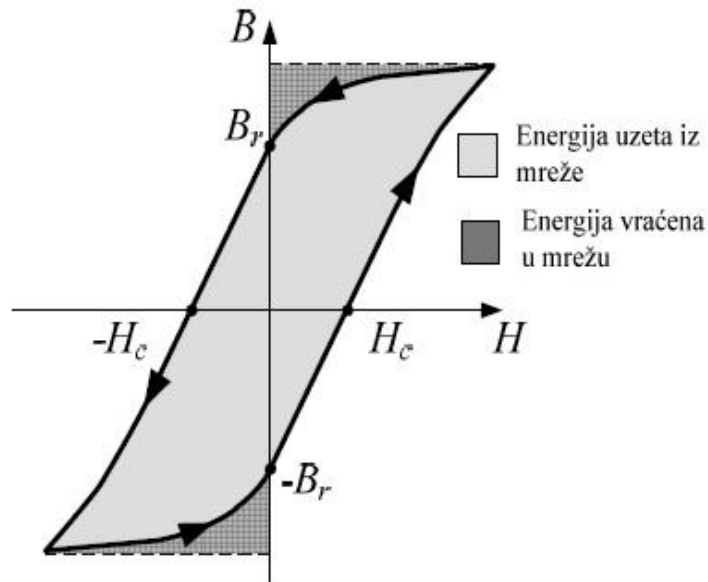
Električne odnosno Jouleove gubitke stvaraju struje uslijed protjecanja u namotima. Dodatni električni gubici, prema [5] potiču od rasipnih magnetskih tokova u samim namotima i koji se očituju kao povećanje otpora uslijed nejednake gustoće struje. Dielektrične gubitke treba uzeti u obzir samo kod transformatora za vrlo visoke napone.

3.1. Gubici u željezu

Postoje dvije vrste gubitaka u željezu: gubici histereze i gubici vrtložnih struja.

Gubici histereze nastaju u željeznoj jezgri zbog izmjeničnog magnetskog polja. Ovisno o frekvenciji, izmjenično magnetsko polje mijenja smjer čestica željeza što izaziva trenje između čestica zbog čega se jezgra zagrijava.

Materijal koji je izložen izmjeničnom magnetskom polju u jednom ciklusu magnetiziranja dio energije prima iz polja, a dio energije vraća u polje. Površina zatvorena petljom histereze jednaka je energiji po jedinici volumena izgubljenoj za svaki ciklus magnetiziranja [2].



Sl. 3.1: Predaja i povrat magnetske energije za vrijeme jednog ciklusa magnetiziranja feromagnetskog materijala. [2]

Gubici histereze ovise o obliku petlje histereze o čemu ovisi vrsta materijala upotrijebljena za transformatorske limove, maksimalnoj vrijednosti indukcije B_m , masi željeza m upotrijebljena za magnetski krug te frekvenciji magnetiziranja magnetskog kruga f odnosno broju premagnetiziranja jezgre. Računaju se prema Steinmetzovoj formuli [5]:

$$P_H = \eta \cdot f \cdot m \cdot B_m^x \quad (3-1)$$

gdje histerezni (Steinmetzov) η koeficijent uzima u obzir vrstu materijala upotrijebljenog za transformatorske limove. EkspONENT „ x “ ovisi kolika je vrijednost magnetske indukcije B_m . Ukoliko je ispod 1T iznosi oko 1.6, između 1 i 1.6T približava se 2, a kod većih indukcija još bitno raste [4].

Gubici vrtložnih struja prisutni su u svim dijelovima magnetskog kruga. Najveći utjecaj je na pojedinim međusobnim izoliranim limovima. Vrtložne struje proporcionalne su indukciji i frekvenciji, a gubici kvadratu struje, prema [5] su gubici zbog vrtložnih struja proporcionalni kvadratu indukcije i kvadratu frekvencije:

$$P_F = \sigma \cdot f^2 \cdot m \cdot B_m^2 \quad (3-2)$$

gdje je σ faktor vrtložnih struja koji ovisi o vrsti materijala odnosno dimenziji limova i njihovih električnih osobina, prema [5]:

$$\sigma = \frac{1,64 \cdot a^2}{\mu_{Fe} \cdot \rho} \quad (3-3)$$

gdje je:

- μ_{Fe} specifična masa limova,
- a debljina jednog izoliranog lima (mm),
- ρ električni otpor lima (Ω/mm).

Smanjenjem faktora vrtložnih struja i gubici su manji.

Sastavljanjem jezgre iz međusobno izoliranih (transformatorskih) limova uvelike se smanjuju gubici vrtložnih struja. Što su limovi tanji to su manji gubici [4]. Sniženje gubitaka postiže se povećavanjem električnog otpora lima, jer se tada uz istu formaciju električnog polja u limu dobiju manje vrtložne struje. Takav učinak postiže se legiranjem lima sa silicijem, prema [4] najviše do 4.5% jer se time povećava tvrdoća i krhkost lima zbog čega se limovi ne mogu valjati pod povoljnim uvjetima. Silicij sužava histerezni ciklus te se smanjuju i gubici histereze.

Gubici u željezu računaju se na osnovu specifičnih gubitaka kod frekvencija 50 Hz i indukcije 1 ili 1.5 T. Specifični gubici moraju se odrediti mjerenjem za svaku kvalitetu lima. Ukupni gubici u željezu za druge indukcije i frekvencije određuju se prema jednadžbi [4]:

$$P_{Fe} = \left[p_h \cdot \frac{f}{50} \cdot B^x + p_f \cdot \left(\frac{f}{50} \cdot B \right)^2 \right] \cdot m \quad (3-4)$$

gdje je:

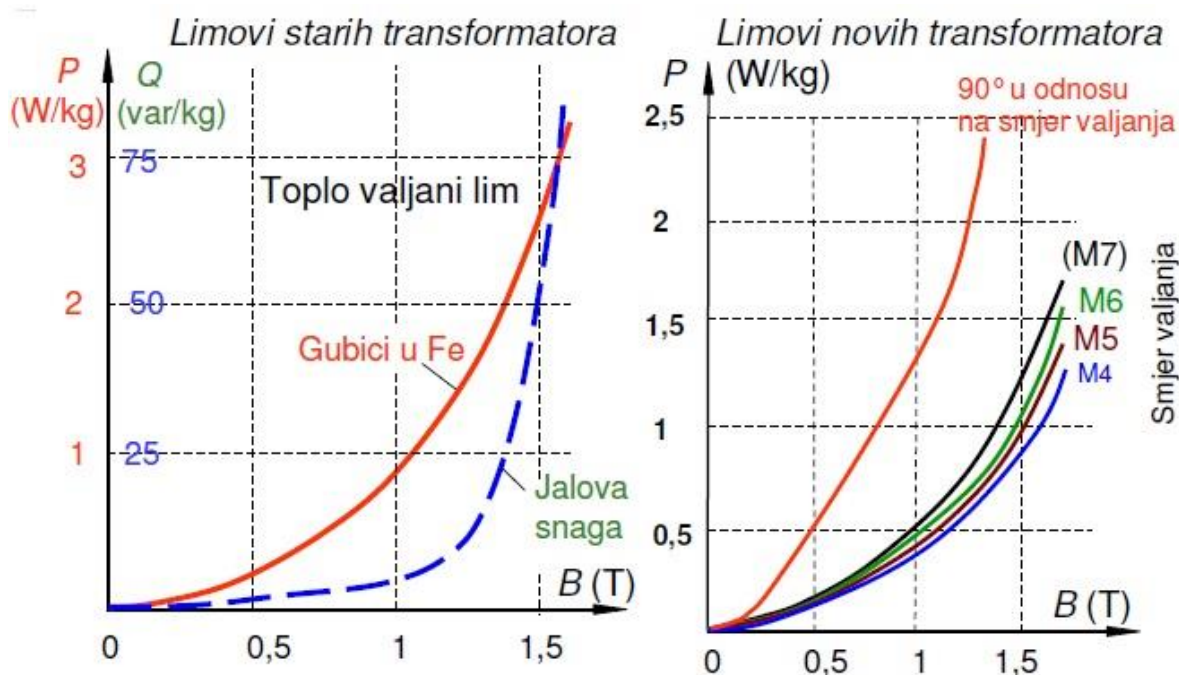
- p_h specifični gubici histereze kod 1 T i 50 Hz na 1 kg lima,
- p_f specifični gubici vrtložnih struja kod 1 T i 50 Hz na 1 kg lima,

Gubici u željezu transformatora su približno stalni za sva opterećenja s obzirom da su Steinmetzov faktor i faktor vrtložnih struja konstante, stalna je masa limova i frekvencija mreže. Pri stalnom naponu mreže na koji je priključen transformator približno je stalna i inducirana EMS pa je i indukcija približno stalna [5].

Transformatorski limovi moraju imati što manje gubitke i što veću magnetsku permeabilnost. Proizvode se određenim tehnološkim procesom, mehaničkom obradom valjanjem u vrućem ili hladnom stanju i termičkom obradom. Hladnim valjanjem i termičkom obradom dobiva se kristalna struktura legure i postiže molekularna orijentiranost u magnetskom pogledu u pravcu valjanja tako da su specifični gubici kod magnetiziranja u tom pravcu znatno manji od specifičnih gubitaka klasičnih, toplo valjanih limova. Takvi limovi nazivaju se još i hipersil-, tekstur-. Radi orijentiranosti u pravcu valjanja su gubici okomito na taj pravac još znatno veći od gubitaka klasičnih toplo valjanih limova. Zbog toga je potrebna posebna konstrukcija jezgre da silnice prolaze samo u pravcu valjanja. [4]

Orijentacija kristala kod ovih limova je takva da se pravac najlakšeg magnetiziranja poklapa sa pravcem valjanja [5].

Na slici 3.2 prikazani su dijagrami specifičnih gubitaka za toplo valjane, odnosno hladno valjane (orijentirane) limove.



Sl. 3.2: Dijagram prosječnih specifičnih gubitaka za toplo valjane i hladno valjane limove. [6]

Na osobine limova utječe veličina kristala, povećanjem dimenzija kristala smanjuju se gubici histereze i koercitivno polje, a povećava magnetska permeabilnost. Utjecaj dimenzija kristala je veći, ako je sadržaj ugljena veći. Limovi sa orijentiranom kristalnom strukturom imaju manji sadržaj silicija u odnosu na toplo valjane jer veliki sadržaj silicija čini valjanje na hladno nemogućim [5].

Krivulja magnetiziranja odnosno indukcija koju postiže transformatorski lim kod određene jakosti polja također određuje kvalitetu lima. Hladno valjani limovi imaju strmiju krivulju magnetiziranja nego normalni limovi. Mala struja magnetiziranja i mali specifični gubici, prema [4], dozvoljavaju gradnju transformatora sa većom indukcijom čime se smanjuje težina transformatora.

Gubici u željezu određuju se pokusom praznog hoda budući da su drugi gubici (u bakru) zanemarivi.

3.2. Gubici u bakru

Gubici u bakru određeni su kvadratom struje i radnim otporom [5]:

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = n_1 \cdot k_F' \cdot I_1^2 \cdot R_1 + n_2 \cdot k_F'' \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (3-5)$$

gdje je:

- n_1 i n_2 broj faza primara odnosno sekundara,
- k_F' i k_F'' Fildov koeficijent za primar odnosno sekundar,

- R_1 i R_2 radni otpor primara odnosno sekundara (Ω),
- I_1 i I_2 struja primara odnosno sekundara (A).

Namoti se izrađuju najčešće od bakra, rjeđe od aluminija. U namotu se javlja utjecaj omskog otpora zbog kojeg se dio snage troši na zagrijavanje namota.

Radni otpor računa se prema [4]:

$$R = \rho \cdot \frac{l_{Cu}}{q} \quad (\Omega) \quad (3-6)$$

gdje je:

- l_{Cu} duljina vodiča (m),
- q presjek vodiča (m^2),
- ρ specifični otpor vodiča kod $20^\circ C$ (najčešće bakar koji ima $\rho = 0,0175 \cdot 10^{-6} \Omega m^2/m$).

Omski otpor vodiča uslijed protjecanja izmjenične struje nešto se povećava u odnosu na istosmjernu struju zbog neravnomjernosti gustoće struje uzrokovanu rasipnim magnetskim tokom oko vodiča. Zbog toga se koristi Fildov koeficijent koji se može izračunati posebno za svaki namot. Povećanje otpora iznosi do nekoliko posto, pa se često i zanemaruje [5]. Gubici u bakru (Jouleova toplina) rastu povećanjem opterećenja a time temperatura bakra i otpor prema [4]:

$$R_t = R_{hl} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\Theta) \quad (3-7)$$

$$\Delta\Theta = \nu_t - \nu_{hl}$$

gdje je:

- ν_t temperatura toplog bakra kod koje otpor iznosi R_t ,
- ν_{hl} temperatura hladnog bakra kod koje otpor iznosi R_{hl} (obično $20^\circ C$),
- α temperaturni koeficijent (za bakar 0,0039, za aluminij 0,004).

Radni pad napona i gubici u bakru zbog preglednosti često se izražavaju u postocima nominalnih vrijednosti transformatora [4]:

$$u_r = \frac{100 \cdot U_r}{U_n} = \frac{100 \cdot I_n \cdot R}{U_n} \% \quad (3-8)$$

$$p_{Cu} = \frac{100 \cdot P_{Cu}}{P_n} = \frac{100 \cdot I_n^2 \cdot R}{U_n \cdot I_n} = \frac{100 \cdot I_n \cdot R}{U_n} \% \quad (3-9)$$

što znači da je postotna vrijednost gubitaka u namotu jednaka postotnoj vrijednosti radnog pada napona u namotu. Nominalni gubici u bakru određuju se pokusom kratkog spoja jer tada praktično ne postoje drugi gubici.

4. ZAKONSKA REGULATIVA U POGLEDU ENERGETSKE UČINKOVITOSTI TRANSFORMATORA

Europski parlament i Vijeće Europske unije donosi Direktivu 2009/125/EZ od 21. listopada 2009. o uspostavi okvira za utvrđivanje zahtjeva za ekološki dizajn proizvoda koji koriste energiju. Ekološki dizajn znači uključivanje ekoloških aspekata u dizajn proizvoda s ciljem poboljšanja njegove ekološke učinkovitosti kroz cijeli njegov ciklus trajanja [7].

Uredba o provedbi Direktive 2009/125/EZ u pogledu malih, srednjih i velikih energetske transformatora stupila je na snagu 11. lipnja 2014. g. [8]. Novom zakonskom regulativom nameće se maksimalna razina gubitaka za distributivne transformatore snaga do 3,15 MVA odnosno minimalna učinkovitost za energetske transformatore snaga većih od 3,15 MVA stavljene na tržište ili puštene u uporabu od 1. srpnja 2015. g. i kupljene nakon 11. lipnja 2014. g. unutar EU. Uredbom se navode zahtjevi u pogledu gubitaka dvjema razinama, od 1. srpnja 2015. (Razina 1.) te od 1. srpnja 2021. (Razina 2.). Novi okvirni ugovori za transformatore između proizvođača i kupca ne bi se smjeli potpisivati ukoliko transformator ne zadovoljava minimalne kriterije koji su doneseni Uredbom. Ciljevi ekološkog dizajna, prema [9], uključuju poboljšanje energetske učinkovitosti i općenito usklađivanje sa zahtjevima zaštite okoliša. U tablici 4.1 navedene su prema Uredbi, definicije po naponu i snazi malog, srednjeg i velikog transformatora.

Tab. 4.1: *Definicije transformatora na koje se primjenjuje Uredba.*

Definicija transformatora	Najviši napon opreme (U_m)	Nazivna snaga (S_r)
Mali energetski transformator	$U_m \leq 1,1 \text{ kV}$	Bilo koja
Srednji energetski transformator	$1,1 \text{ kV} \leq U_m \leq 36 \text{ kV}$	$5 \text{ kVA} \leq S_r \leq 40 \text{ MVA}$
Veliki energetski transformator	$U_m \geq 36 \text{ kV}$ Bilo koji	$S_r \geq 5 \text{ kVA}$ $S_r \geq 40 \text{ MVA}$

4.1. Minimalni zahtjevi za energetske učinkovitost

4.1.1. Zahtjevi za srednje energetske transformatore (distributivni transformatori $\leq 3150 \text{ kVA}$)

U tablici 4.2 je navedena razina gubitaka tereta i praznog hoda za srednje transformatore uronjene u tekućinu s jednim namotom napona $U_m \leq 24 \text{ kV}$ i drugim namotom napona $U_m \leq 1,1 \text{ kV}$. Za suhe transformatore istih naponskih nivoa, razina gubitaka prikazana je u tablici 4.3.

Tab. 4.2: Razina gubitaka za srednje energetske transformatore uronjene u tekućinu. [8]

Nazivna snaga (kVA)	Razina 1. (od 1. srpnja 2015.)		Razina 2. (od 1. srpnja 2021.)	
	Najviši gubici tereta (W)	Najviši gubici praznog hoda (W)	Najviši gubici tereta (W)	Najviši gubici praznog hoda (W)
≤ 25	C _k (900)	A ₀ (70)	A _k (600)	A ₀ – 10% (63)
50	C _k (1100)	A ₀ (90)	A _k (750)	A ₀ – 10% (81)
100	C _k (1750)	A ₀ (145)	A _k (1250)	A ₀ – 10% (130)
160	C _k (2350)	A ₀ (210)	A _k (1750)	A ₀ – 10% (189)
250	C _k (3250)	A ₀ (300)	A _k (2350)	A ₀ – 10% (270)
315	C _k (3900)	A ₀ (360)	A _k (2800)	A ₀ – 10% (324)
400	C _k (4600)	A ₀ (430)	A _k (3250)	A ₀ – 10% (387)
500	C _k (5500)	A ₀ (510)	A _k (3900)	A ₀ – 10% (459)
630	C _k (6500)	A ₀ (600)	A _k (4600)	A ₀ – 10% (540)
800	C _k (8400)	A ₀ (650)	A _k (6000)	A ₀ – 10% (585)
1000	C _k (10500)	A ₀ (770)	A _k (7600)	A ₀ – 10% (693)
1250	B _k (11000)	A ₀ (950)	A _k (9500)	A ₀ – 10% (855)
1600	B _k (14000)	A ₀ (1200)	A _k (12000)	A ₀ – 10% (1080)
2000	B _k (18000)	A ₀ (1450)	A _k (15000)	A ₀ – 10% (1305)
2500	B _k (22000)	A ₀ (1750)	A _k (18500)	A ₀ – 10% (1575)
3150	B _k (27500)	A ₀ (2200)	A _k (23000)	A ₀ – 10% (1980)

Najviši gubici za nazivne snage u kVA koje se nalaze između snaga navedenih u tablici 4.2 dobivaju se linearnom interpolacijom.

Usporede li se zahtjevi Uredbe na gubitke u praznom hodu sa dosadašnjim zahtjevima u tehničkim specifikacijama HEP-ODS-a za transformatore prema normi EN 50464-1, primjerice za nazivnu snagu 630 kVA, novi transformatori prema Razini 1. moraju biti minimalno klase A₀ odnosno s minimalno 30% nižim gubicima [12]. Uvođenjem Razine 2. gubici trebaju biti ukupno 38% niži. Novi transformatori u pogledu zahtjeva na gubitke tereta do uključivo 1000 kVA moraju biti iste klase – C_k. Novi transformatori snaga 1250 – 2000 kVA moraju biti sa minimalno 17% nižim gubicima. Uvođenjem Razine 2. od 1. srpnja 2021. svaki novi transformator mora biti minimalno klase A_k odnosno sa minimalno ukupno 30% nižim gubicima (primjer 630 kVA). Primjer je prikazan na slici 4.1.

Rated power kVA	E0		D0		C0		B0		A0		Short circuit impedance %
	P0 W	LwA dB(A)	P0 W	LwA dB(A)	P0 W	LwA dB(A)	P0 W	LwA dB(A)	P0 W	LwA dB(A)	
50	190	55	145	50	125	47	110	42	90	39	4
100	320	59	260	54	210	49	180	44	145	41	
160	460	62	375	57	300	52	260	50	210	44	
250	650	65	530	60	420	55	360	50	300	47	
315	770	67	630	61	500	57	440	52	350	49	
400	930	68	750	63	580	58	520	53	400	50	
500	1100	69	880	64	680	59	610	54	450	51	
630	1300	70	1030	65	860	60	730	55	600	52	
800	1200	70	940	65	800	60	680	55	560	52	
800	1400	71	1150	66	930	61	800	56	650	53	
1000	1700	73	1400	68	1100	63	940	58	770	55	
1250	2100	74	1750	69	1350	64	1150	59	950	56	
1600	2600	76	2200	71	1700	66	1450	61	1200	58	
2000	3100	78	2700	73	2100	68	1800	63	1450	60	
2500	3500	81	3200	76	2500	71	2150	66	1750	63	

Rated power KVA	Dk	Ck	Bk	Ak	Short circuit impedance %
	W	W	W	W	
50	1350	1100	875	750	4
100	2150	1750	1475	1250	
160	3100	2350	2000	1700	
250	4200	3200	2750	2350	
315	5000	3900	3250	2800	
400	6000	4600	3850	3250	
500	7200	5500	4600	3900	
630	8400	6500	5400	4600	
800	8700	6750	5600	4800	
800	10500	8400	7000	6000	
1000	13000	10500	9000	7600	
1250	16000	13500	11000	9500	
1600	20000	17000	14000	12000	
2000	26000	21000	18000	15000	
2500	32000	26500	22000	18500	

0% (referenca, Co)
-30% (Ao)
-38% (Ao-10%)

0% (referenca, Ck)
-17% (Bk)
-30% (Ak)

Sl. 4.1: Usporedba zahtjeva za gubitke u praznom hodu i gubitke tereta. [12]

Tab. 4.3: Razina gubitaka za srednje energetske suhe transformatore. [8]

Nazivna snaga (kVA)	Razina 1. (1. srpnja 2015.)		Razina 2. (1. srpnja 2021.)	
	Najviši gubici tereta (W)	Najviši gubici praznog hoda (W)	Najviši gubici tereta (W)	Najviši gubici praznog hoda (W)
≤ 50	B _k (1700)	A ₀ (200)	A _k (1500)	A ₀ – 10% (180)
100	B _k (2050)	A ₀ (280)	A _k (1800)	A ₀ – 10% (252)
160	B _k (2900)	A ₀ (400)	A _k (2600)	A ₀ – 10% (360)
250	B _k (3800)	A ₀ (520)	A _k (3400)	A ₀ – 10% (468)
400	B _k (5500)	A ₀ (750)	A _k (4500)	A ₀ – 10% (675)
630	B _k (7600)	A ₀ (1100)	A _k (7100)	A ₀ – 10% (990)
800	A _k (8000)	A ₀ (1300)	A _k (8000)	A ₀ – 10% (1170)
1000	A _k (9000)	A ₀ (1550)	A _k (9000)	A ₀ – 10% (1395)
1250	A _k (11000)	A ₀ (1800)	A _k (11000)	A ₀ – 10% (1620)
1600	A _k (13000)	A ₀ (2200)	A _k (13000)	A ₀ – 10% (1980)
2000	A _k (16000)	A ₀ (2600)	A _k (16000)	A ₀ – 10% (2340)
2500	A _k (19000)	A ₀ (3100)	A _k (19000)	A ₀ – 10% (2790)
3150	A _k (22000)	A ₀ (3800)	A _k (22000)	A ₀ – 10% (3420)

Najviši gubici za nazivne snage u kVA koje se nalaze između snaga navedenih u tablici 4.3 dobivaju se linearnom interpolacijom. Uspoređujući s tablicom 4.2, suhi transformatori do 630 kVA prema Razini 1. trebaju imati razinu gubitaka tereta B_k , a od 800 kVA do 3150 kVA čak A_k . Za transformatore koji imaju drugačije kombinacije napona namota ili dvostrukog napona u jednom ili oba namota, nazivnih snaga do uključujući 3150 kVA Uredba propisuje ispravak razine gubitaka što je prikazano u sljedećoj tablici.

Tab. 4.4: *Ispravak razine gubitaka.* [8,9]

Ispravak	Najviši gubici praznog hoda	Najviši gubici tereta
SN namot $U_m \leq 24$ kV NN namot $U_m > 1,1$ kV	+ 10 %	+10 %
SN namot $U_m \leq 36$ kV NN namot $U_m > 1,1$ kV	+ 15%	+ 10%
SN namot $U_m \leq 36$ kV NN namot $U_m > 1,1$ kV	+ 20%	+ 15%
Dvostruki napon na NN namotu	Nema ispravaka gubitaka. Najviša snaga na nižem naponu NN namota ograničena na 0,85 nazivne snage NN namota kod višeg napona	
Dvostruki napon na SN namotu	Nema ispravaka gubitaka. Najviša snaga na nižem naponu SN namota ograničena na 0,85 nazivne snage SN namota kod višeg napona	
Dvostruki napon na jednom namotu (ako je dostupna puna nominalna snaga kod svih napona)	+ 15%	+ 10%
Dvostruki napon na oba namota	+ 20%	+ 20%
Transformatori s otcjepima za rad pod naponom ili pod teretom (npr. distributivni transformatori s regulacijom napona)	+ 20% (Razina 1.) + 10% (Razina 2.)	+ 5%

4.1.2. Zahtjevi za srednje transformatore koji se postavljaju na stup

Dosada navedene razine gubitaka u tablicama 4.2 i 4.3 ne mogu se primijeniti na transformatore koji se postavljaju na stup (stupne TS). Razina gubitaka propisana Uredbom koja se primjenjuje za transformatore uronjene u tekućinu koji se postavljaju na stup prikazana je u tablici 4.5. Naponi namota su kao i u prethodnom odjeljku (SN namot ≤ 24 kV, NN namot $\leq 1,1$ kV).

Tab. 4.5: Razina gubitaka za srednje transformatore uronjene u tekućinu koji se postavljaju na stup. [8]

Nazivna snaga (kVA)	Razina 1. (1. srpnja 2015.)		Razina 2. (1. srpnja 2021.)	
	Najviši gubici tereta (W)	Najviši gubici praznog hoda (W)	Najviši gubici tereta (W)	Najviši gubici praznog hoda (W)
25	C _k (900)	A ₀ (70)	B _k (725)	A ₀ (70)
50	C _k (1100)	A ₀ (90)	B _k (875)	A ₀ (90)
100	C _k (1750)	A ₀ (145)	B _k (1475)	A ₀ (145)
160	C _k + 32% (3102)	C ₀ (300)	C _k + 32% (3102)	C ₀ – 10% (270)
200	C _k (2750)	C ₀ (356)	B _k (2333)	B ₀ (310)
250	C _k (3250)	C ₀ (425)	B _k (2750)	B ₀ (360)
315	C _k (3900)	C ₀ (520)	B _k (3250)	B ₀ (440)

Uspoređujući s tablicom 4.2, za nazivne snage ≥ 160 kVA za najviše gubitke praznog hoda do 2021. godine i dalje vrijedi klasa C₀.

4.1.3. Zahtjevi za srednje i velike energetske transformatore

Uredbom se za srednje energetske transformatore nazivne snage veće od 3150 kVA i ≤ 40 MVA te za velike energetske transformatore ne propisuje maksimalnu razinu gubitaka već indeks najniže vršne učinkovitosti (engl. *Peak Efficiency Indeks, PEI*). Indeks vršne učinkovitosti, prema [8,9], je najviša vrijednost omjera između prenesene prividne snage transformatora umanjene za električne gubitke i prenesene prividne snage transformatora:

$$PEI = 1 - \frac{2 \cdot (P_0 + P_{c0})}{S_r \cdot \sqrt{\frac{P_0 + P_{c0}}{P_k}}} \quad (4-1)$$

gdje je:

- P_0 gubici praznog hoda mjereni pri nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji u nazivnom položaju,
- P_{c0} električna energija potrebna za rashladni sustav u praznom hodu,
- P_k gubici tereta mjereni pri nazivnoj struji i nazivnoj frekvenciji u nazivnom položaju, korigirani na referentnu temperaturu prema EN 60076-1,
- S_r nazivna snaga transformatora na kojoj se temelje gubici tereta (P_k).

Tab. 4.6: Minimalni zahtjevi za indeks najniže vršne učinkovitosti za srednje energetske suhe transformatore. [8]

Nazivna snaga (MVA)	Razina 1. (1. srpnja 2015.)	Razina 2. (1. srpnja 2021.)
	Indeks najniže vršne učinkovitosti (%)	
$3,15 \leq S_r \leq 4$	99,348	99,382
5	99,354	99,387
6,3	99,356	99,389
8	99,357	33,390
≥ 10	99,357	99,390

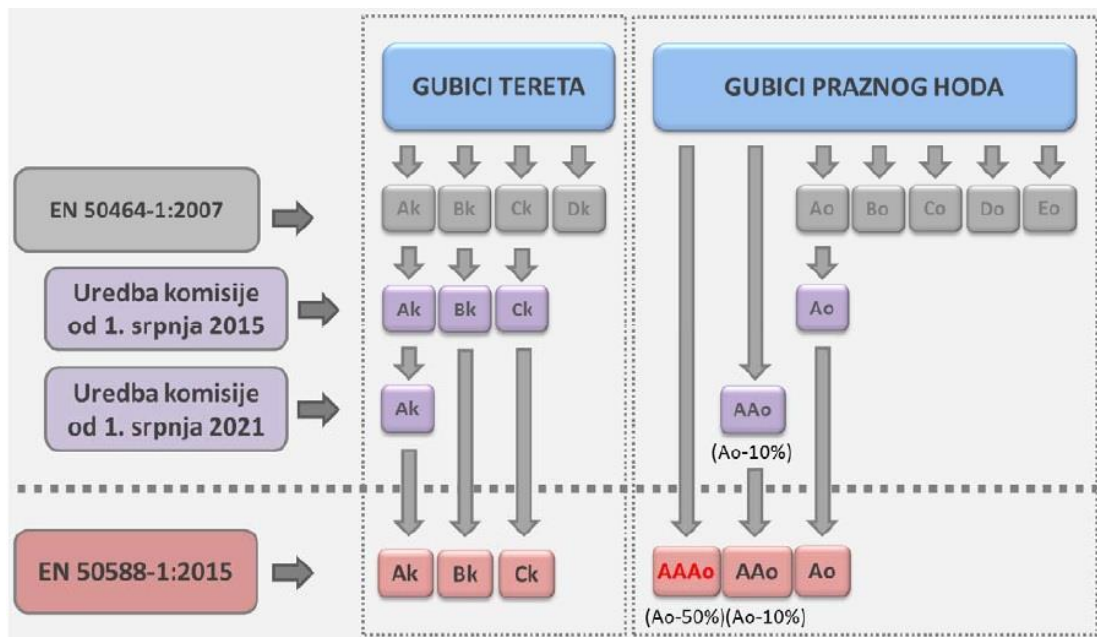
Tab. 4.7: Minimalni zahtjevi za indeks najniže vršne učinkovitosti za velike energetske transformatore uronjene u tekućinu. [8]

Nazivna snaga (MVA)	Razina 1. (1. srpnja 2015.)	Razina 2. (1. srpnja 2021.)
	Indeks najniže vršne učinkovitosti (%)	
≤ 4	99,465	99,532
5	99,483	99,548
6,3	99,510	99,571
8	99,535	99,593
10	99,560	99,615
12,5	99,588	99,640
16	99,615	99,663
20	99,639	99,684
25	99,657	99,700
31,5	99,671	99,712
40	99,684	99,724
50	99,696	99,734
63	99,709	99,745
80	99,723	99,758
≥ 100	99,737	99,770

Tab. 4.8: Minimalni zahtjevi za indeks najniže vršne učinkovitosti za velike energetske suhe transformatore. [8]

Nazivna snaga (MVA)	Razina 1. (1. srpnja 2015.)	Razina 2. (1. srpnja 2021.)
	Indeks najniže vršne učinkovitosti (%)	
≤ 4	99,158	99,225
5	99,200	99,265
6,3	99,242	99,303
8	99,298	99,356
10	99,330	99,385
12,5	99,370	99,422
16	99,416	99,464
20	99,468	99,513
25	99,521	99,564
31,5	99,551	99,592
40	99,567	99,607
50	99,585	99,623
≥ 63	99,590	99,626

Standardom EN50464-1:2007 koji je vrijedio do donošenja ove Uredbe, definirane su bile 5 razina gubitaka praznog hoda oznakama: A₀, B₀, C₀, D₀ i E₀, te 4 razine gubitaka opterećenja oznakama: A_k, B_k, C_k i D_k. Oznake A₀ odnosno A_k predstavljaju najnižu razinu, dok E₀ odnosno D_k najvišu razinu gubitaka. Uredbom je najveća dozvoljena vrijednost gubitaka praznog hoda za distributivne transformatore nazivnih snaga ≤ 3150 kVA snižena na A₀ prvom razinom od 1.7.2015. Drugom razinom od 1.7.2021. ta je razina snižena za još 10% odnosno A₀-10% (AA₀). Situacija je za distributivne transformatore koji se postavljaju na stup, srednje > 3150 kVA i velike energetske transformatore drugačija. Shodno Uredbi, donesen je i novi standard za distributivne transformatore EN50588-1:2015 kojom se uvodi dodatna razina A₀-50% ali ne kao maksimalne, već jedne od razina [13].



Sl. 4.2: Razine gubitaka distributivnih transformatora do 3150 kVA. [13]

Usporedbom dozvoljenih razina gubitaka prema slici 4.2, veći se značaj daje smanjenju gubitaka praznog hoda te su oni znatno više smanjeni nego gubici tereta. Jedan od razloga zbog kojih se više pažnje daje gubicima praznog hoda jest da je prosječni faktor opterećenja distributivnih transformatora oko 20% osim u visoko industrijaliziranim područjima [10]. Uslijed ovakvih okolnosti, bitnu komponentu ukupnih gubitaka transformatora čine gubici u jezgri (željezu) ili gubici praznog hoda. Smanjenje gubitaka praznog hoda do određene razine se u osnovi može ostvariti ukoliko se jezgra izradi od kvalitetnijeg materijala što ne utječe na dimenzije i težinu transformatora dok se gubici tereta smanjuju najčešće povećanjem presjeka vodiča čime se povećavaju dimenzije i težina transformatora [13].

4.2. Informacije o proizvodu

Donošenjem Uredbe u svakoj povezanoj dokumentaciji o proizvodu mora biti navedena:

- nazivna snaga, gubici tereta, gubici praznog hoda, električna snaga potrebna za bilo koji rashladni sustav u praznom hodu;
- vrijednost indeksa vršne učinkovitosti (*PEI*) i snazi pri kojoj nastaje (za srednje velike transformatore ukoliko je primjenjivo i za velike transformatore);
- u slučaju transformatora s dvostrukim naponom, najviša nazivna snaga kod nižeg napona namota;
- podaci o masi svih glavnih sastavnih dijelova transformatora;
- vidljiv natpis „Isključivo za uporabu na stupu“ za srednje velike transformatore koji su za to namijenjeni.

Transformatori koji zadovoljavaju zahtjeve ekološkog dizajna moraju imati oznaku CE kojom se dokazuje sukladnost i Izjavu o sukladnosti.

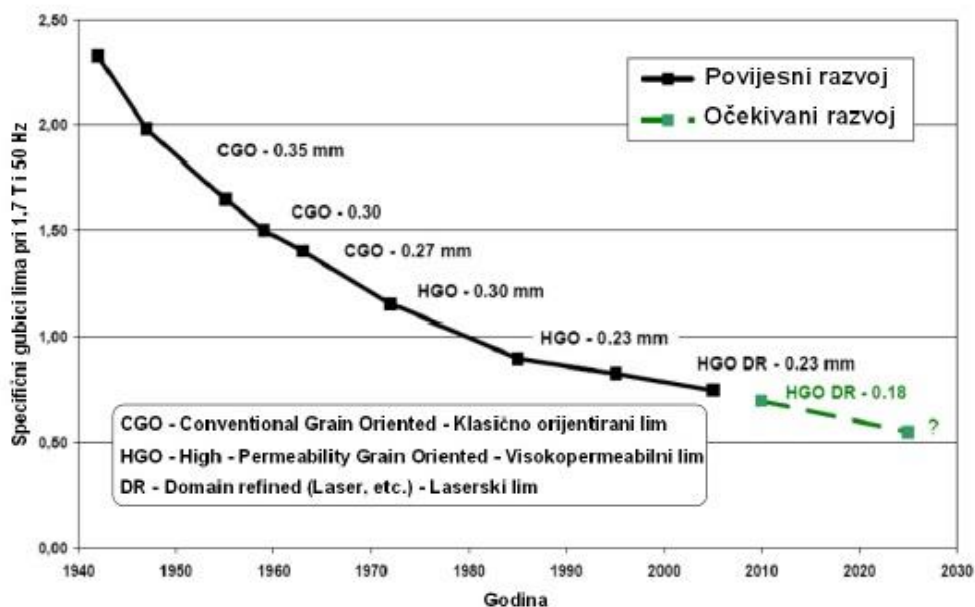
5. JEZGRE DISTRIBUTIVNIH TRANSFORMATORA

5.1. Klasična tehnologija izrade jezgri

Materijal za jezgru razvija se još od izuma transformatora kako bi postigao željenu frekvenciju uz niske gubitke pri visokoj indukciji. Primjenom kvalitetnijeg materijala mogu se do određene razine smanjiti gubici praznog hoda. Jezgre za klasične distributivne transformatore uobičajeno se izrađuju od tri vrste magnetski orijentiranih limova, prema [10]:

- klasični (eng. *CGO – conventional grain oriented*)
- visokopermeabilni (eng. *HGO – high permeability grain oriented*)
- laserski (eng. *HGO DR – high permeability grain oriented domain refined*).

Razvojem tehnologije u području transformatorskih limova u posljednjih 60-ak godina, specifični gubici lima smanjeni su oko 2,5 puta što je prikazano na sljedećoj slici.



Sl. 5.1: Razvoj transformatorskog lima za izradu jezgri kroz godine. [10]

U sljedećoj tablici prikazane su karakteristike navedenih magnetski orijentiranih limova prema oznakama koje se koriste u praksi [10].

Tab. 5.1: Karakteristike magnetski orijentiranih limova. [10]

Vrsta lima	Oznaka lima	Debljina [mm]	Tipični spec. gubici pri 1,7 T i 50 Hz [W/kg]
Klasični	M6	0,35	1,43
	M5	0,30	1,22
	M4	0,27	1,16
	M3	0,23	1,06
	M2	0,18	<1
Visokopermeabilni	M0H-30 (H2)	0,30	1,02
	M0H-27 (H1)	0,27	0,97
Laserski	ZDKH-27 (H1-DR)	0,27	0,87
	ZDKH-23 (H0-DR)	0,23	0,78

U današnje vrijeme se za slagane jezgre najčešće koriste limovi M4, M5, ZDKH-23 i ZDKH-27 [10]. Gubici praznog hoda osim o specifičnim gubicima lima, ovise i o faktoru kvarenja kroz proizvodnju (eng. *building factor*) [10].

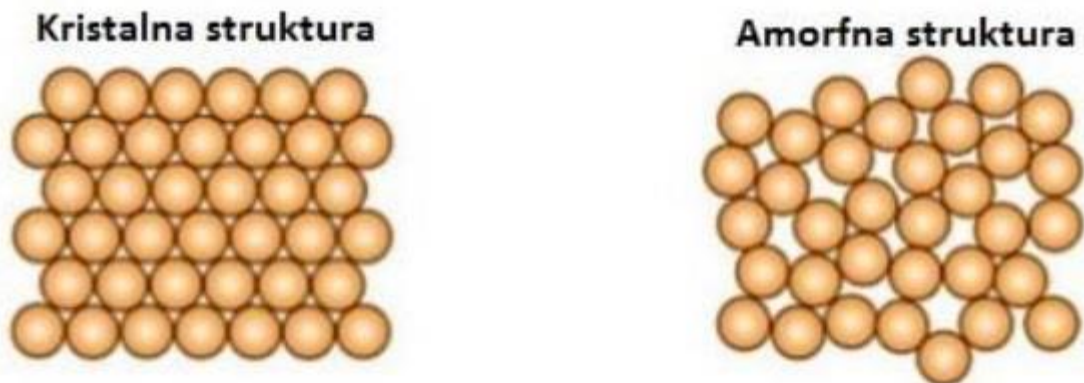
Izradom jezgri transformatora od magnetski orijentiranog lima postiže se razina gubitaka A_k/AA_0 a najnižu razinu gubitaka AAA_0 trenutno je moguće postići jedino ukoliko se za jezgru koristi amorfni materijal. Distributivni transformatori s magnetskom jezgrom sačinjenom od feromagnetskih amorfnih metala prirodno postižu znatno manje gubitke u odnosu na klasične magnetski orijentirane limove.

U pogledu zastupljenosti amorfnih transformatora, u svjetskim okvirima zauzimaju oko 5% tržišta distributivnih transformatora, prvenstveno u zemljama s frekvencijom od 60 Hz u kojoj su gubici praznog hoda 32% veći nego na 50 Hz te jednofaznim transformatorima. Najrasprostranjeniji su u Americi i Aziji. Udio na američkom tržištu iznosi oko 10% dok na japanskom oko 30% [10]. Prema podacima iz [16], oko 70 000 amorfnih transformatora je ugrađeno diljem svijeta. Amorfne jezgre koriste se više od 20 godina u uljnim transformatorima dok se u suhim polagano počinju primjenjivati [25]. Prvi prototipovi amorfnih transformatora u Hrvatskoj su proizvedeni 2003. godine u tvrtki Končar D&ST, 3 komada nazivnih snaga 100 kVA. 2014. godine proizvedeno je još 8 komada amorfnih distributivnih transformatora koji su ugrađeni u distributivnu mrežu HEP-a (4 komada od 100 kVA i 4 komada od 250 kVA) [13]. Industrija transformatora u Europi tradicionalno je usmjerena na proizvodnju slaganih jezgara od magnetski orijentiranih limova. U Europi prema [10], ne postoji proizvođač amorfne materijala dok je u svijetu dominantan proizvođač Metglas-Hitachi Metals što svakako utječe na visoku cijenu amorfne materijala.

6. AMORFNI TRANSFORMATORI

6.1. Amorfni metali

Amorfni metali su topološki neuređeni sistemi koji ne pokazuju prisustvo dugodosežnog uređenja periodične kristalne rešetke. Karakterizira ih uređenje kratkog doseg na udaljenostima nanometra. Svojom strukturom podsjećaju na staklo te se često nazivaju „metalnim staklima“ ili nekristaličnim slitinama [14]. Za razliku od magnetski orijentiranog lima koji ima kristalnu strukturu i ravnomjerno raspoređene atoma s ponavljajućim uzorcima, amorfni materijal je metalna legura sa nekristalnom strukturom, tj. nasumičnom raspodjelom atoma. Amorfna struktura s atomske točke gledanja, analogna je strukturi tekućine te ju karakteriziraju makroskopska izotropnost, nepostojanje uređenosti na daljinu u rasporedu atoma i postojanje pravilnog rasporeda atoma na blizinu [15].



Sl. 6.1: Usporedba kristalne i amorfne strukture materijala. [28]

Amorfni metal u pravilu je legura željeza s borom, silicijem i fosforom. Dobiva se velikom brzinom hlađenja rastaljene legure čime se sprječava kristalizacija tekuće faze i na taj način se zadržava atomska konfiguracija koja postoji u tekućem stanju, što znači da u krutom stanju atomska struktura zadržava slučajan raspored.

U rastaljenim metalnim legurama preraspodjele atoma se odvijaju brzo tako da je za proizvodnju metalnog stakla potrebna velika brzina hlađenja kako bi se spriječila kristalizacija. Staklasti metal zadržava amorfnu strukturu pri brzinama hlađenja većim od 10^5 K/s.

Za otkriće amorfni metala općenito je zaslužan P. Duwez, koji je 1960. zajedno sa suradnicima proizveo amorfnu Au-Si metalnu slitinu ultrabrzim kaljenjem iz taljevine. Amorfne legure općenito su definirane formulom [16]:

$$M_a Y_b Z_c \quad (6-1)$$

gdje je:

- *M* jedan ili više metala iz grupe koju čine željezo, nikel, kobalt, vanadij i krom,
- *Y* nemetalni element (fosfor, bor, ugljik),
- *Z* polumetal (aluminij, silicij, germanij).

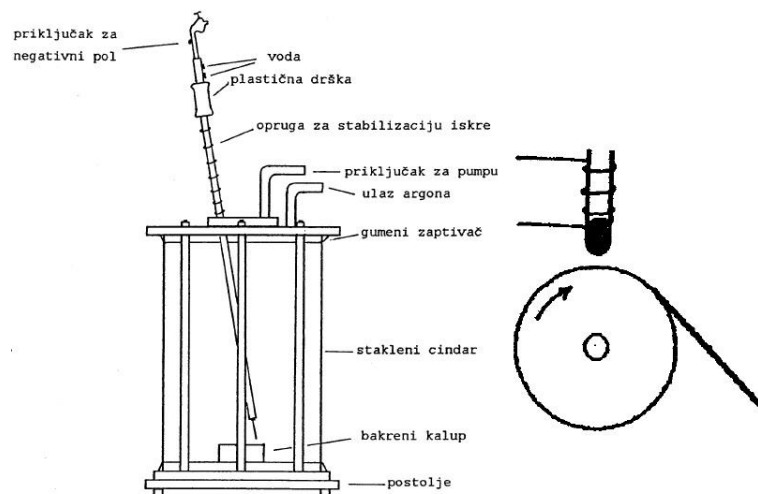
Oznake a, b i c predstavljaju atomski postotak i kreću se redom za svaki element od 60-90, 10-30 te 0,1-15.

Amorfni metali najširu primjenu nalaze upravo za izradu jezgri transformatora. Otkriće Fe-B-Si amornog metala sredinom 1980-ih bio je najznačajniji napredak u materijalima za distributivne transformatore u drugoj polovici 20. stoljeća.

6.2. Proizvodnja amornih limova i montaža transformatora

Načini na koji se proizvode amorfni limovi su prema [14] sljedeći: katodno prskanje, evarpacija, bombardiranje kristalnih materijala visoko energetske ionima, depozicija iz kemijske otopine ili elektrolita, hidriranje kristalnih materijala te ultrabrzno kaljenje iz tekuće ili plinovite faze. Posljednja spomenuta tehnika je najstarija i danas najprihvaćenija metoda proizvodnje [14].

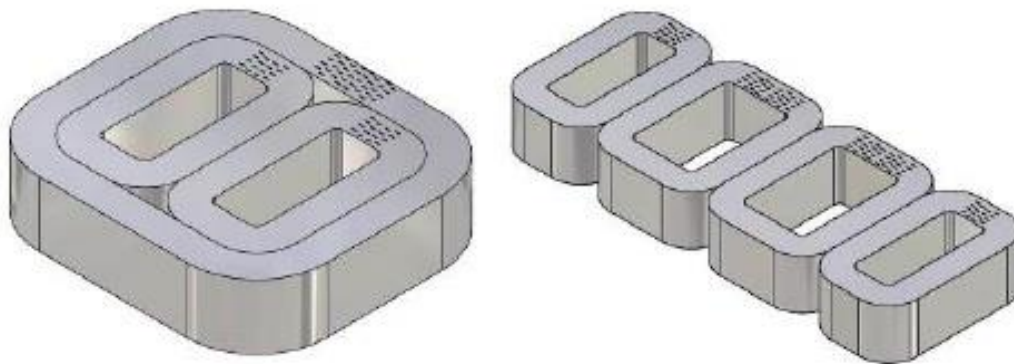
Proizvodni proces je vrlo kompleksan. Proizvodnja počinje otapanjem legure željeza, bora i silicija u argonskoj peći. Komponente se stavljaju u bakreni kalup koji je smješten unutar staklenog cilindra koji se ispumpa a zatim u njega upušta čisti argon kako bi se postigla inertna atmosfera [14]. Električnim lukom se komponente rastale, a hlađenjem se dobiva kristalna slitina koja se zatim smješta u kvarcnu cjevčicu koja se nalazi unutar zavojnice visoko frekventnog generatora. Unutar zavojnice se stvara visoko magnetsko polje koje inducira struje unutar slitine koja se zagrijava i rastali. Slitina se zatim štrca na rotirajući kotač i pri kontaktu mlaza s bakrenom površinom kotača – visoko vodljivim medijem, dolazi do zamrzavanja slitine [14]. Zbog centrifugalne sile slitina se u obliku trake odvaja od kotača.



Sl. 6.2: Tehnika dobivanja amornog lima ultrabrzim kaljenjem iz tekućeg stanja. [14]

Vremenom su se razvile različite varijante ove tehnike kako bi se povećala efikasnost i što veća brzina hlađenja. Kako bi se osigurala velika brzina hlađenja i postigla potrebna magnetska svojstva, debljina metala iznosi 25-50 μm , što je oko 1/10 debljine konvencionalnih limova i dobivaju se dugačke uske trake širine 142, 170 ili 213 mm. Za izradu amorfne jezgre u tvrtki Končar koriste se dva amorfna materijala: Metglas 2605SA1 (SA1) i 2605HB1 (HB1) [13].

Amorfne jezgre motane su iz trake jedne širine te je zbog toga presjek amorfni jezgri pravokutan [13]. Složena jezgra se toplinski obrađuje u jakom magnetskom polju kako bi postigla male gubitke u jezgri. Za trofazne distributivne transformatore, amorfne jezgre izvode se kao trostupne ili peterostupne i prikazane su na slici [13]. Peterostupna jezgra izvodi se od dvije jednofazne jezgre pozicionirane u sredini a rubne stupove čine dvije manje jezgre.



Sl. 6.3: Prikaz trostupne i peterostupne amorfne jezgre. [13]

Montaža amornog transformatora je najzahtjevniji dio proizvodnje i zahtjeva vrlo pažljivu manipulaciju amornim materijalom. Nakon što se izrade namoti, otvaraju se jezgre i montiraju namoti. Namoti se na trostupnu jezgru stavljaju u horizontalnom položaju, dok na peterostupnu u vertikalnom. Jaram motanih jezgara je u oba slučaja napravljen od puno tankih amornih limova koji se prvo otvaraju, a nakon montiranja namota ponovno zatvaraju što zahtjeva dosta vremena i puno pažnje dok se manipulira tankim i krkim amornim limom. Namoti se nakon montaže na stupove i zatvaranja gornjeg jarma uklinjuju na stup pri čemu treba biti veliki oprez da se ne ošteti lim jezgre. Ostatak procesa proizvodnje isti je kao kod klasičnog distributivnog transformatora. Trostupne izvedbe nešto su povoljnije u odnosu na peterostupne jer je masa jezgre i transformatora niža, niži su gubici praznog hoda uz isti poprečni presjek i neznatno nižu indukciju. Dimenzije trostupnih izvedbi transformatora su kraće, ali više. Nedostatak je kompliciraniji proces montaže s dugačkim gornjim jarmom u horizontalnom položaju. [13]

Zbog krhkosti i savitljive strukture amornog metala proizvodnja je ograničena na manje distributivne transformatore. Jezgra treba biti toplinski obrađena u prisutnosti magnetskog polja kako bi se postigao puni potencijal nižih gubitaka jezgre i snage magnetiziranja.



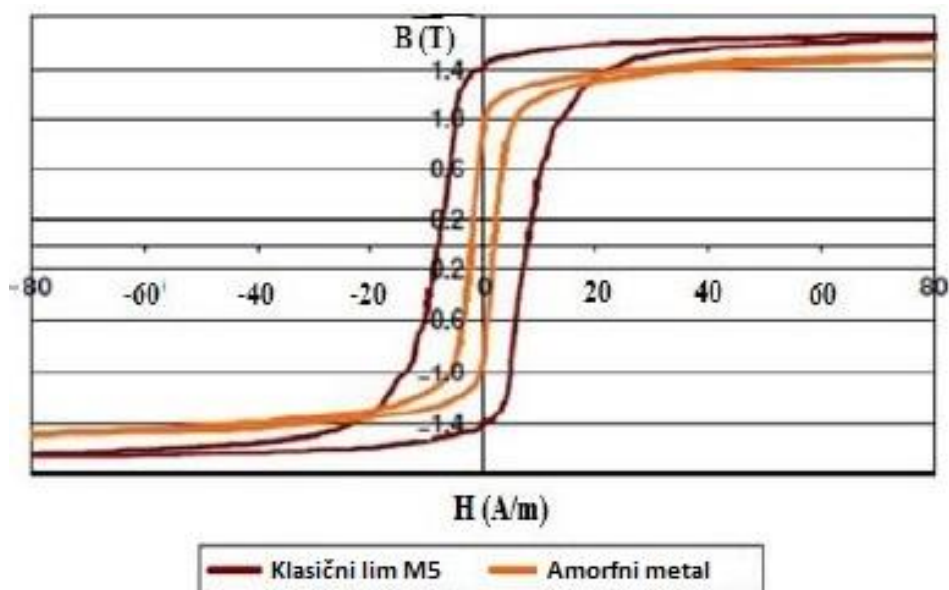
Sl. 6.4: *Otvaranje jezgre.* [29]

6.3. Karakteristike amorfnih transformatora

6.3.1. Magnetska svojstva

Amorfne legure pružaju superiorna magnetska svojstva u odnosu na klasične magnetski orijentirane limove. Nasumični raspored atoma omogućuje vrlo lako magnetiziranje materijala i niže specifične gubitke. Veličina gubitaka koji nastaju u jezgri određena je lakoćom magnetiziranja. Distributivni amorfní transformatori postižu 50-70% niže gubitke praznog hoda u odnosu na najbolje klasične limove za transformatore [13]. Uzme li se u obzir da je udio gubitaka praznog hoda u ukupnim gubicima distributivnih transformatora u zemljama EU27 veći od 70% i čine oko 25% svih tehničkih gubitaka u mreži, to predstavlja veliku uštedu.

Nedostatak kristalne strukture omogućava lako magnetiziranje materijala. Lako magnetiziranje odražava se odnosom između magnetske indukcije i magnetskog polja. Krivulja magnetiziranja amornog metala SA1 prikazana je na sljedećoj slici. Uskost $B-H$ krivulje, visoka permeabilnost, mala koercitivnost i mali gubici histereze potvrđuju relativno lako magnetiziranje. Gubici histereze čine 50-70% ukupnih gubitaka praznog hoda [21].



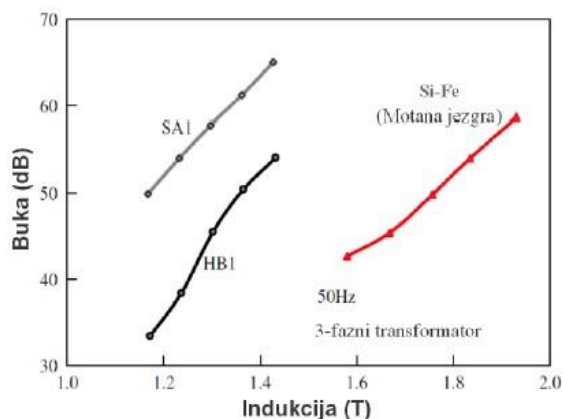
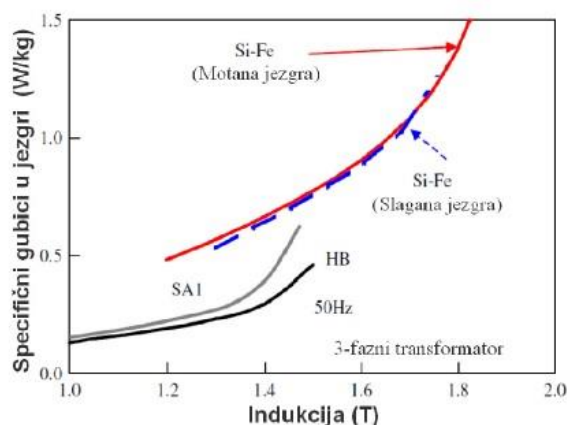
Sl. 6.5: Krivulja magnetiziranja amornog metala i klasičnog magnetski orijentiranog lima M5. [21]

Gubici tereta ovise o opterećenju i otpornosti namota.

Za manji poprečni presjek jezgre, magnetska indukcija je veća zbog čega se povećavaju gubici [18]. Zbog prisutnosti bora, indukcija zasićenja je manja u odnosu na klasične transformatore zbog čega su veće dimenzije i težina amornog transformatora. Amorfni transformator dakle ima manju radnu indukciju zbog čega je veći poprečni presjek jezgre što povećava namote i dimenzije transformatora. Iako indukcija zasićenja iznosi oko 80% konvencionalnog magnetskog lima, amorfna legura ima upotrebljivu radnu indukciju od 1,4 T. Pri indukciji od 1,4T i frekvenciji 60 Hz, amorfni metal ima 70% manje gubitke u jezgri u odnosu na M2 klasični lim [17].

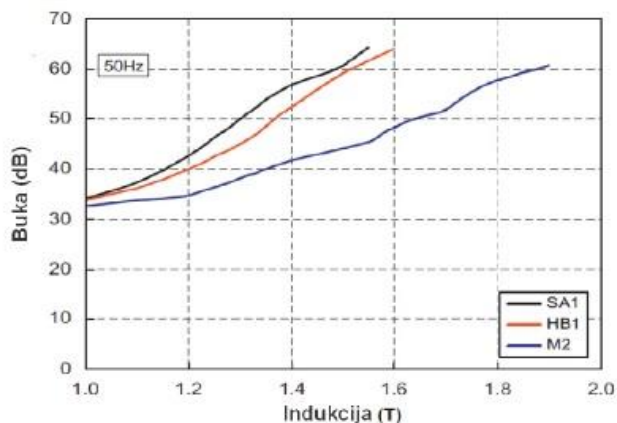
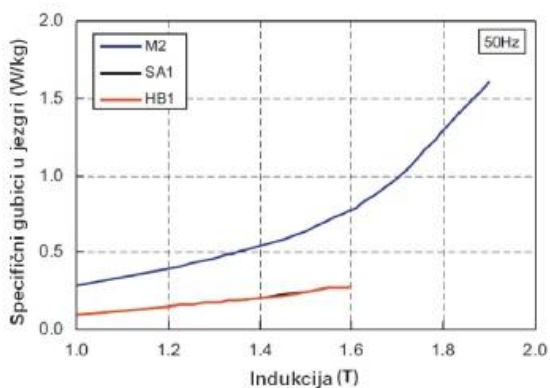
Magnetostrikcija je pojava pri kojoj se pod utjecajem magnetskog polja mijenja duljina tijela načinjenog od feromagnetskog materijala. Magnetostrikcija amornog metala je veća u odnosu na klasični lim zbog čega amorfni transformator proizvodi od 3 do 5 dB veću buku [19]. Zbog toga se u standardu EN50558-1 za razinu gubitaka AAA₀, koja se može postići jedino amornim transformatorima, ne navodi vrijednost za buku odnosno zvučnu snagu L_{wa}, nego se dogovara direktno između kupca i proizvođača [13].

Da bi se poboljšalo stanje zbog buke i dimenzija, razvijena je nova vrsta amornog materijala HB1, koja u usporedbi sa starijim SA1 posjeduje bolje karakteristike. Materijal HB1 ima nižu buku, veću indukciju zasićenja koja prema [19] iznosi oko 1,64 T odnosno 1,56 T za SA1 čime se smanjuju dimenzije na samo 10% u odnosu na klasični transformator. Usporedba specifičnih gubitaka jezgre i buke za trofazne transformatore snage 200 kVA čije su jezgre napravljene od amornih materijala SA1, HB1 te magnetski orijentiranog lima prikazana je na sljedećoj slici.

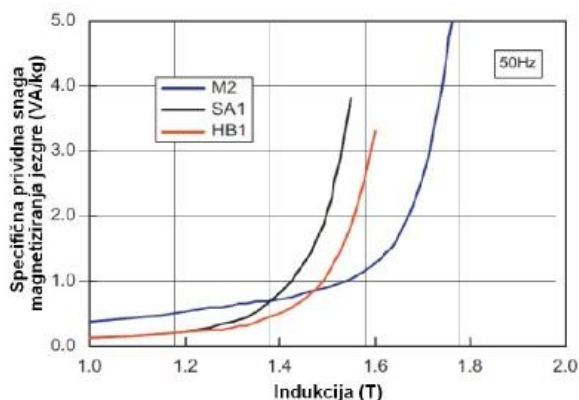


Sl. 6.6: Usporedba specifičnih gubitaka jezgre i buke za transformator od amorfnih materijala i magnetski orijentiranog lima. [10]

Prema [20], uspoređeni su amorfni metali SA1, HB1 i klasični magnetski lim M2. Rezultati potvrđuju manje gubitke praznog hoda i nižu struju odnosno snagu magnetiziranja. Struja magnetiziranja ovisi o $B-H$ krivulji i broju spojeva prilikom slaganja jezgre. U usporedbi s klasičnim, struja magnetiziranja amorfno transformatora je manja za $2/3$. U odgovarajućem području, potrebna specifična snaga magnetiziranja za jezgre od amorfnih materijala je oko tri puta manja u odnosu na jezgre od M2 lima [10].



Sl. 6.7: Usporedba specifičnih gubitaka jezgre i buke amorfno materijala i M2 lima. [10]



Sl. 6.8: Snaga magnetiziranja za jezgre od SA1, HB1 i M2 materijala. [10]

Vrijednost indukcije pri kojoj snaga magnetiziranja počinje brže rasti je puno veća za HB1 materijal u usporedbi s SA1 materijalom.

Karakteristike trofaznog transformatora utvrđene prema [20], nazivne snage 500 kVA, 50 Hz s jezgrom od amorfnog materijala i klasičnog Fe-Si lima prikazane su u tablici koja ukazuje uštedu u gubicima od 450W.

Tab. 6.1: Karakteristike transformatora s amorfnom i klasičnom jezgrom. [20]

Karakteristike	HB1	SA1	Fe-Si
Težina (omjer)	1,17	1,23	1
Gubici praznog hoda (W)	215	215	665
Ukupni gubici pri 40% opterećenju (W)	1207	1207	1353
Buka (dB)	55	58	53

Reluktancija amorfnе jezgre iznosi oko $\frac{1}{4}$ klasične jezgre zbog čega je manja magnetska nesimetrija a posljedica toga i manja nulta komponenta struje.

6.3.2. Tehnološka svojstva

Spomenuto je da debljina amorfnog materijala iznosi 1/10 magnetski orijentiranog lima zbog čega su specifični gubici oko 3 puta manji pri istoj indukciji. Amorfnі materijal ima tvrdoću 4-5 puta veću od Fe-Si. Nedostaci su veća osjetljivost na naprezanje, veća žilavost i lomljivost, teško se reže i buši i zbog navedenog je potrebna pažnja prilikom manipuliranja vrlo tankim i krtnim limovima. Amorfnа jezgra ima malu izdržljivost na vanjska naprezanja nasuprot klasičnih jezgri koje su krute i pružaju mehaničku potporu namotima [26]. Amorfnа jezgra ne može držati svoju vlastitu težinu te su potrebne zaštitne mjere protiv vanjskih naprezanja kako bi se održala mehanička čvrstoća aktivnih dijelova.

Faktor slaganja iznosi 80% dok je za jezgru od magnetski orijentiranih limova 95% što povećava dimenzije i slabija je iskoristivost amorfnog materijala. Niski gubici postižu se i toplinskom obradom - izlaganjem temperaturi bliskoj Curievoj temperaturi materijala u određenom vremenskom trajanju u prisutnosti narinutog vanjskog magnetskog polja [25]. Svrha toplinske obrade je smanjiti unutarnja naprezanja koja su prouzrokovana proizvodnjom amorfnog lima jako brzim hlađenjem.

Magnetska anizotropija je svojstvo feromagnetskog materijala koji predstavlja određeni smjer pri kojem se lako magnetizira i prvenstveno obilježava kristalne strukture. Toplinskim obradom (eng. *annealing*) naprezanja su smanjena i djelovanjem vanjskog magnetskog polja tipično 1000 A/m,

postiže se pogodna os magnetiziranja (duž duljine trake) i bolji uvjeti što se tiče buke. Posljedica ove obrade da prethodno rastezljivi metal postaje lomljiv.

Amorfna jezgra je motana i ima pravokutni presjek zbog navedenih mehaničkih svojstava za razliku od klasičnih slaganih jezgara od klasičnog lima [13]. Pravokutni presjek amorfne jezgre zahtjeva i namotaje pravokutne oblika koji su skuplji i zahtjevniji s tehnološke strane. Pravokutni oblik jezgre najnepovoljniji je i po pitanju kratkog spoja. Elektromagnetske sile proporcionalne su kvadratu struje. Tijekom kratkog spoja struja može biti veća do 20 puta od nazivne vrijednosti pa elektromagnetske sile mogu biti 400 puta veće nego u normalnim okolnostima. Prema [18], elektromagnetske sile pravokutnog oblika namota nisu homogene i mogu izobličiti oblik zavojnice. To je još jedan razlog zbog kojeg pravokutni oblik jezgre nije pogodan za velike transformatore. Prema [26], francuski ERDF (eng. *Électricité Réseau Distribution France*) proveo je ispitivanja izdržljivosti amornih transformatora na kratki spoj. Transformatori su zadovoljili zahtjeve.

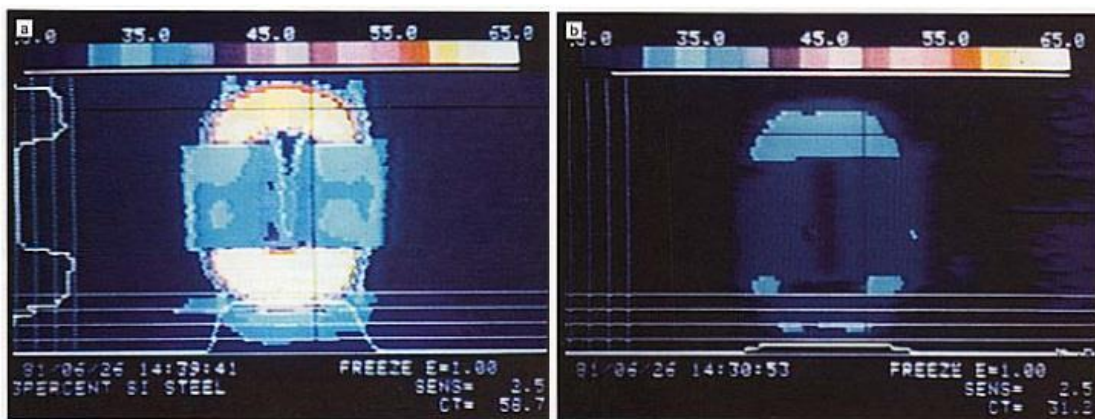
Cijena amornog materijala veća je oko 3 puta od cijene magnetski orijentiranog lima. Veća cijena amornog materijala, kompleksnija proizvodnja, pažnja prilikom manipuliranja i veća količina materijala za namote čine amorfne transformatore skupljim i kompleksnijim od klasičnih. Amorfni transformatori imaju veću početnu cijenu od 15-30%.

Razvojem nove vrste amornog materijala HB1, transformator snage 100 kVA postiže istu razinu gubitaka kao i isti transformator od SA1 jezgre, uz 100-tinjak kilograma nižu masu i imaju manju buku [13].

Stabilnost svojstava amornih metala pri radnim temperaturama transformatora je vrlo velika te bi svojstva niskih gubitaka trebala postojati više od 1000 godina [25].

6.3.3. Električna svojstva

Nasumična atomska struktura i visoki sadržaj metaloida i nemetalnih komponenti ograničavaju prosječan slobodni put elektrona što dovodi do povećanja električne otpornosti 2-3 puta veće od kristalne legure i uz manju debljinu lima, manji su gubici vrtložnih struja [17]. Električna otpornost amornog metala iznosi oko $130 \mu\Omega\text{cm}$ u usporedbi s $50 \mu\Omega\text{cm}$ za klasične limove [25]. Gubici vrtložnih struja čine oko 30-50% ukupnih gubitaka praznog hoda [21]. Relativna učinkovitost amornog i klasičnog distributivnog transformatora prikazana je na slici 6.5., usporedbom zagrijavanja namota zbog gubitaka jezgre. Autor nije naveo pri kojem opterećenju je provedeno ispitivanje. Amorfna jezgra se manje zagrijava zbog smanjenih gubitaka.



Sl. 6.9: Infracrvena analiza: a) klasični distributivni transformator, b) amorfni transformator. [17]

Viši harmonici povećavaju transformatorske gubitke. Zbog niže indukcije zasićenja, struja uklopa (eng. *inrush current*) amornog transformatora je veća i veći je problem s trećim harmonikom. Međutim, povećanje gubitaka zbog viših harmonika manje je 2-3 puta nego kod klasičnih transformatora za stupanj izobličenja od 75% [20].

Niža indukcija utječe na nižu učinkovitost pri punom opterećenju. Korištenjem više materijala za namote i većih dimenzija jezgre smanjuje se utjecaj niže indukcije. Na taj način amorfni su transformatori učinkovitiji i pri malom i velikom opterećenju ali uz veće dimenzije [25].

6.3.4. Utjecaj na okoliš

U SAD-u i mnogim zapadnim država, elektroenergetske kompanije gube status reguliranog monopola. Konkurencija nameće smanjenje troškova, povećanje usluge i poboljšanje pouzdanosti sustava s manje kapitalnih sredstava. Utjecaj na okoliš mora se uzeti u obzir zbog smanjenja emisije stakleničkih plinova. Elektroenergetski sustav doprinosi emisiji CO₂ i ostalih štetnih plinova s obzirom da se većina električne energije proizvodi u elektranama s neobnovljivim izvorima energije [11].

Poboljšanje učinkovitosti elektroenergetskog sustava ugradnjom amornih transformatora omogućuju ostvarenje navedenih zahtjeva. Izborom amornih transformatora umjesto klasičnih distributivnih transformatora smanjuje se emisija stakleničkih plinova i pruža se mogućnost postizanja ekonomskih i ekoloških pogodnosti [11]. Prema [17], Američka agencija za zaštitu okoliša izvršila je procjenu potrebe goriva i emisije štetnih plinova za proizvodnju električne energije. U tablici su prikazane izračunate uštede ugradnjom distributivnih amornih transformatora i smanjenje gubitaka energije [17].

Tab. 6.2: Utjecaj na okoliš ugradnjom amorfnih distributivnih transformatora. [17]

Ušteda	SAD	Europa	Japan	Kina	Indija
Električna energija (milijardi kWh)	40	25	11	9	2
Nafta (milijun barela)	70	45	20	15	4
CO ₂ (milijun tona)	35	20	10	12	3
NO _x (tisuću tona)	110	70	30	90	22
SO ₂ (tisuću tona)	260	160	75	210	52

Prema [22], procjenjuje se da su samo u Velikoj Britaniji gubici distributivnih transformatora $4 \cdot 10^9$ kWh što odgovara $12 \cdot 10^6$ tona ugljena a zauzvrat uzrokuje emisiju od $500 \cdot 10^3$ tona CO₂ i $50 \cdot 10^3$ tona SO₂ svake godine.

Godišnje smanjenje emisije CO₂ ugradnjom amorfnih distributivnih transformatora napravljena unutar Vattenfall grupe (Švedska, Njemačka i Poljska) prikazano je na sljedećoj tablici. Usporedba je napravljena za kondenzacijsku termoelektranu s emisijskim faktorom 0,723 kg/kWh električne energije. Procjena je izvršena za transformatore koji se nalaze u gradu i selu, tj. opterećeni 20 i 10%.

Tab. 6.3: Godišnja ušteda emisije CO₂ ugradnjom amorfnih distributivnih transformatora. [11]

Nazivna snaga transformatora	Profil opterećenja 10%		Profil opterećenja 20%	
	El. energija [kWh]	CO ₂ [kg]	El. energija [kWh]	CO ₂ [kg]
100 kVA	1,314	950	1,402	1,013
400 kVA	3,592	2,597	4,030	2,913
630 kVA	3,664	2,649	5,379	3,889

Godišnja ušteda u emisiji CO₂ izborom amorfnih transformatora ovisi o profilu opterećenja.

6.3.5. Ekonomska usporedba

Klasične i amorfne distributivne transformatore teško je direktno usporediti zbog različitih vrijednosti gubitaka.

Niža radna indukcija povećava dimenzije amorfnog transformatora i cijena amorfnog materijala veća je oko tri puta od cijene magnetski orijentiranog lima zbog čega amorfni transformatori imaju veću početnu cijenu. Ekonomski se ove dvije vrste transformatora imaju smisla uspoređivati po kapitaliziranoj cijeni transformatora (eng. *TOC – Total Owning Cost*). [10]

Kapitalizirana cijena transformatora uzima u obzir početnu cijenu te troškove gubitaka i održavanja transformatora za vrijeme njegove životne dobi. Ovakav pristup razmatra uzorke

opterećenja, troškove energije, inflaciju, kamatne stope i ostale ekonomske faktore za računanje neto sadašnje vrijednosti 1 W električne energije.

Budući troškovi gubitaka tijekom životnog vijeka koji se nazivaju i ukupnim troškom posjedovanja ili kapitaliziranim troškom transformatora preračunavaju se u neto sadašnju vrijednost i dodaju početnoj cijeni transformatora [12]:

$$TOC = C_i + \Delta C \text{ (kn/ nakon 'n' godina)} \quad (6-2)$$

gdje su:

- C_i početna nabavna cijena transformatora (kn)
- ΔC troškovi gubitaka tijekom životnog vijeka (kn).

Da bi se izračunali troškovi gubitaka tijekom životnog vijeka, gubici se moraju sagledavati prema trenutku kupnje da bi bili stavljeni u istu perspektivu sa početnom cijenom [27]. Izrazom 6-2 izračunava se trošak kupovine, korištenja i održavanja transformatora i u obzir se uzima vremenska promjenjivost vrijednosti novca. Početna cijena amorfnog transformatora veća je od cijene klasičnog transformatora te se postavlja pitanje može li se opravdati povećana početna cijena kroz smanjene troškove gubitaka tokom životnog vijeka. Metodom kapitalizacije troškova gubitaka ili kapitaliziranom cijenom transformatora uspoređuju se i ocjenjuju ukupni troškovi transformatora tijekom cijelog životnog vijeka [12].

$$TOC = C_i + A \cdot P_0 + B \cdot P_k \text{ (kn/nakon 'n' godina)} \quad (6-3)$$

gdje je:

- A kapitalizacijski faktor za gubitke u praznom hodu (godišnja kapitalizirana cijena gubitaka u praznom hodu po kW gubitaka) (kn/kW)
- P_0 gubici praznog hoda (kW)
- B kapitalizacijski faktor za gubitke tereta (godišnja kapitalizirana cijena gubitaka tereta po kW gubitaka) (kn/kW)
- P_k gubici tereta (kW).

Svaki pojedini transformator ima različitu nabavnu cijenu i faktore gubitaka dok se troškovi ugradnje, održavanja i demontiranja ne uzimaju u obzir jer su slični za slične tehnologije. U obzir se uzimaju jedino kada se uspoređuju primjerice suhi i uljni transformatori.

Amorfni transformatori zbog nižih gubitaka imaju niže troškove eksploatacije (gubitaka) tijekom životne dobi te se isplativost ocjenjuje cijenom gubitaka. Za primjer je napravljena usporedba amornog i klasičnog transformatora snaga 100 kVA, prema [12].

Kapitalizacijski faktor za gubitke u praznom hodu računa se prema izrazu 6-4:

$$A = 8760 \cdot C_e \cdot F_c \text{ (kn/kW)} \quad (6-4)$$

gdje je:

- 8760 broj sati u jednoj godini (h)
- C_e cijena električne energije (kn/kWh)
- F_c faktor neto sadašnje vrijednosti.

Kapitalizacijski faktor za gubitke tereta izračunava se prema izrazu 6-5 [12]:

$$B = 8760 \cdot C_e \cdot L^2 \cdot F_c \text{ (kn/kW)} \quad (6-5)$$

gdje je:

- L faktor tereta.

Za faktor tereta vrijedi izraz [12]:

$$L^2 = \left(\frac{P_{tren}}{P_n} \right)^2 \quad (6-6)$$

Aproksimacijom se dobiva [12]:

$$P_{tren} = 0,2 \cdot P_n \quad (6-7)$$

a aproksimacijom za HEP-ODS [12]:

$$L^2 = \left(\frac{0,2 \cdot P_n}{P_n} \right)^2 = 0,2^2 = 0,04 \quad (6-8)$$

Za faktor neto sadašnje vrijednosti vrijedi izraz [12]:

$$F_c = \sum_{k=0}^n \frac{1}{(1+i)^k} = \frac{1}{(1+i)^0} + \frac{1}{(1+i)^1} + \dots + \frac{1}{(1+i)^n} = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \quad (6-9)$$

gdje je:

- i diskontna stopa, na koju utječe cijena kapitala i inflacija (%)
- n broj razmatranih godina.

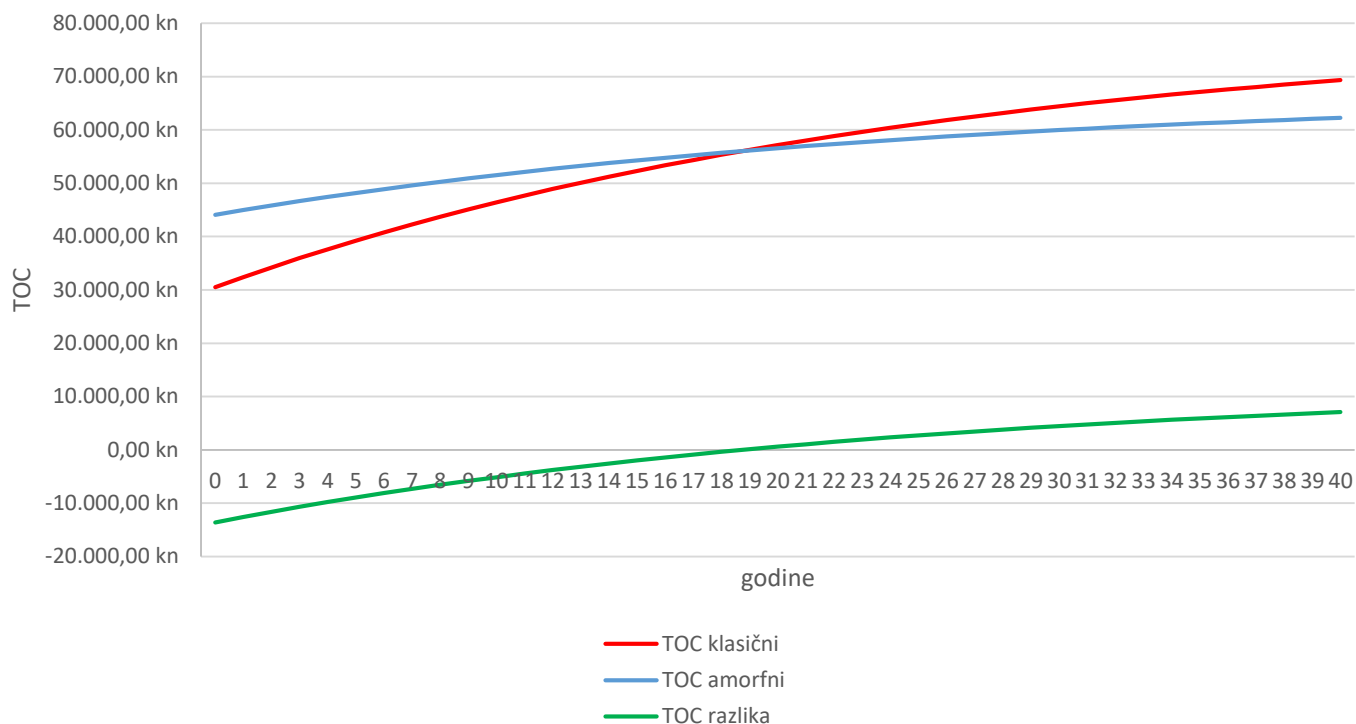
Aproksimacijom i sređivanjem, preuređeni izraz glasi:

$$TOC = C_i + (P_0 + P_k \cdot L^2) \cdot 8760 \cdot C_e \cdot F_c \text{ (kn/nakon 'n' godina)} \quad (6-10)$$

Podaci o uspoređenim transformatorima potrebni za proračun nalaze se u tablici. Za analizu za vrijednost diskontne stope uzeta je vrijednost 4% [12] (kamatna stopa za posljednje izdane HEP-ove obveznice).

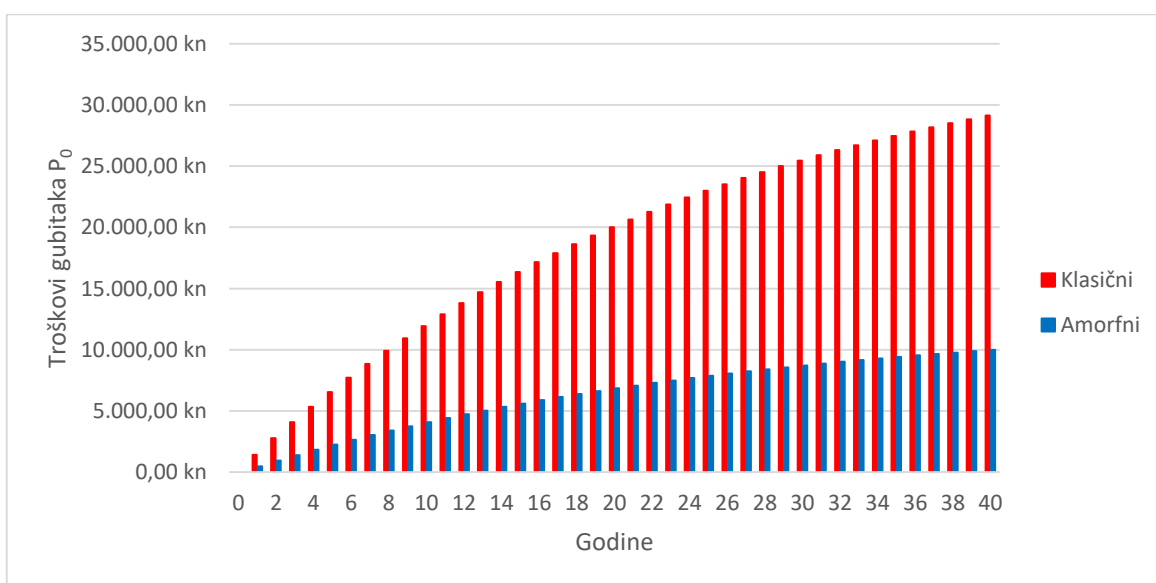
Tab. 6.4: Parametri uspoređivanih transformatora. [12]

PARAMETAR	KLASIČNI TRANSFORMATOR	AMORFNI TRANSFORMATOR
Prijenosni omjer [kV]	10(20)/0,42	10(20)/0,42
Nazivna snaga [kVA]	100	100
Grupa spoja	Yzn5	Yzn5
Napon kratkog spoja u_k [%]	4	4
Gubici praznog hoda P_0 [kW]	0,210	0,072
Gubici tereta P_k [kW]	1,75	1,475
Početna nabavna cijena C_i [kn]	30.500,00	44.100,00
Cijena električne energije C_e [kn]	0,80	0,80
Faktor tereta L^2	0,04	0,04
Diskontna stopa i	0,04	0,04
Radni vijek transformatora (broj godina) n	40	40

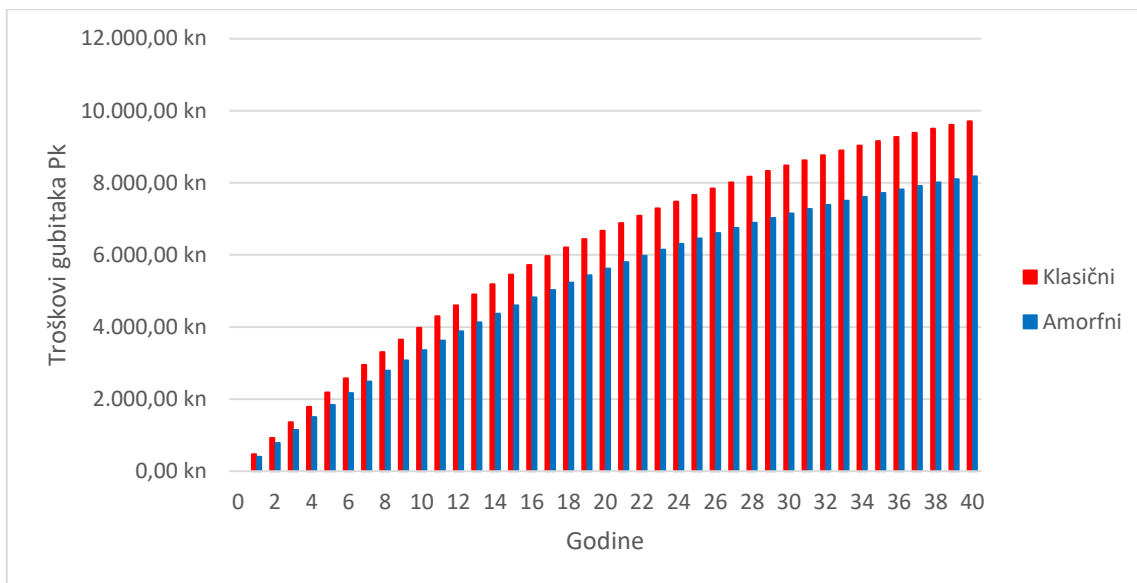


Grafikon 6.1: Usporedba transformatora prema TOC metodi.

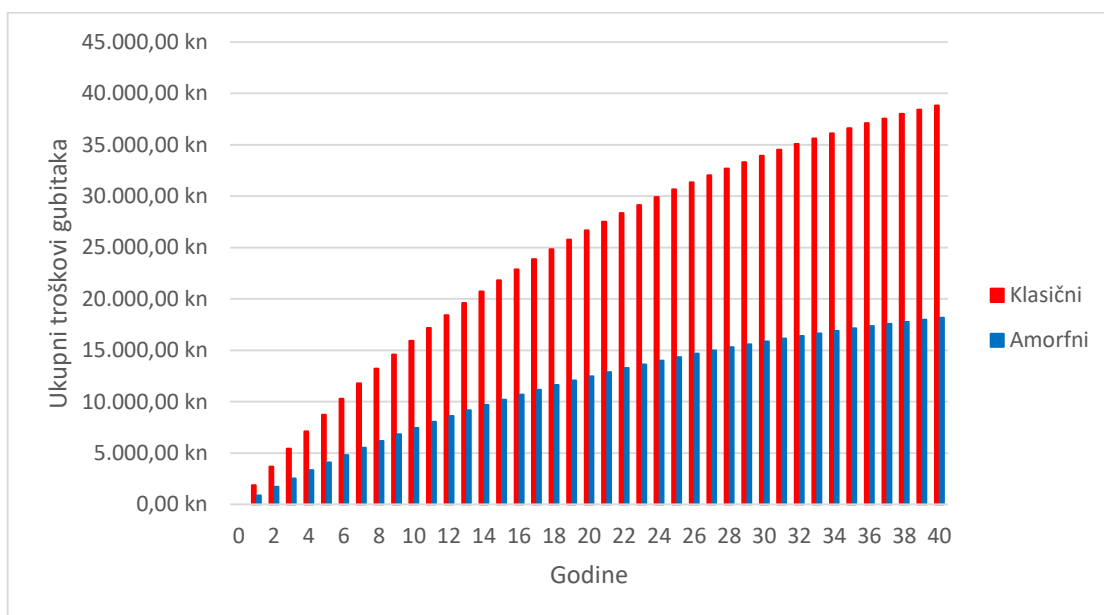
Na grafikonu 6.1 su prikazane dvije krivulje koje prikazuju kapitaliziranu cijenu klasičnog odnosno amornog transformatoru. Treća krivulja prikazuje razliku između dvije kapitalizirane cijene iz koje se vidi kako amorfni transformator uzevši u obzir i početnu višu cijenu, ekonomski postaje isplativ nakon 18 godina. Nakon 18. godine radnog vijeka, amorfni transformatori imaju niže troškove eksploatacije. Međutim, troškovi gubitaka amornog transformatora od početka su manji i s godinama je razlika sve veća u odnosu na klasični što je prikazano na sljedećim grafikonima.



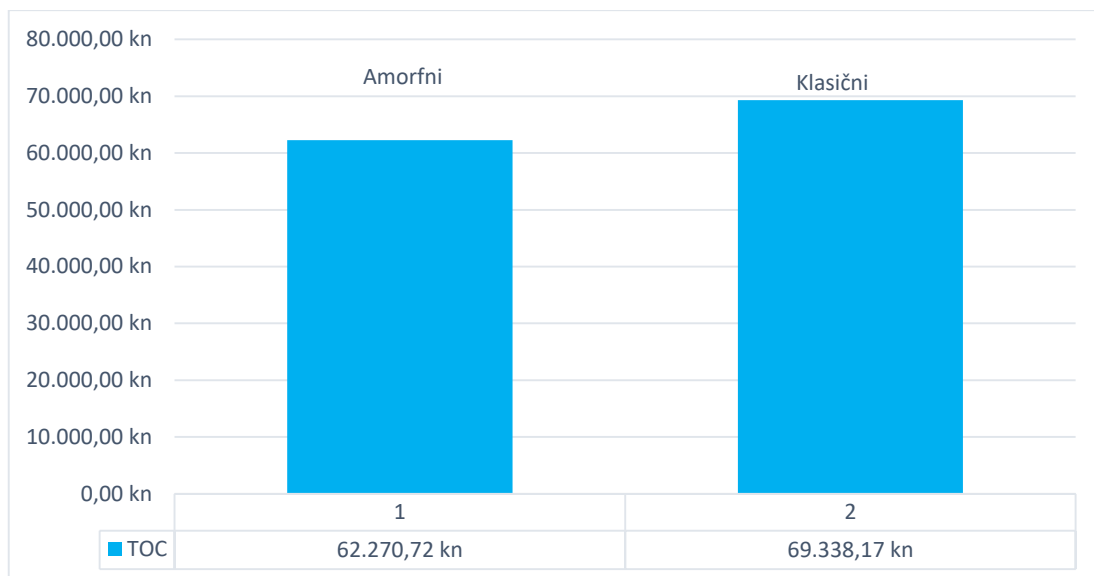
Grafikon 6.2: Usporedba troškova gubitaka praznog hoda tijekom godina.



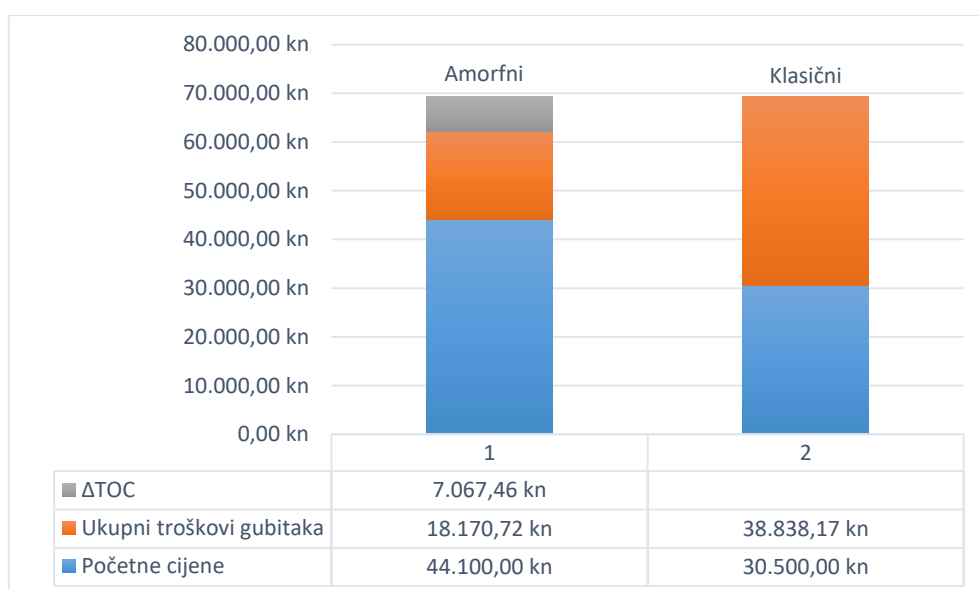
Grafikon 6.3: *Usporedba troškova gubitaka tereta tijekom godina.*



Grafikon 6.4: *Ukupni troškovi gubitaka tijekom godina.*



Grafikon 6.5: Usporedba kapitaliziranih troškova.



Grafikon 6.6: Komponente TOC metode

Amorfni transformatori imaju veću početnu cijenu, ali su troškovi gubitaka odmah na početku radnog vijeka smanjeni. Kako se povećavaju godine, razlika između troškova gubitaka amornog i klasičnog transformatora postaje sve veća i amorfni transformatori postaju isplativiji. Ukoliko se posebno uspoređuju troškovi gubitaka praznog hoda i gubitaka tereta, veća je ušteda u pogledu gubitaka praznog hoda koja se postiže izradom jezgre od kvalitetnijeg amornog materijala i potvrđuje dosadašnja razmatranja. Razlika kapitaliziranih cijena u 40. godini iznosi 7.067,46 kn, što znači da unatoč višoj početnoj cijeni, postoji dobit od amornog transformatora.

Analiza pokazuje opravdanost ugradnje amornih transformatora zato što su isplativi u toku životnog vijeka. Unatoč višoj početnoj cijeni, imaju manje ukupne troškove.

7. SIMULACIJA U DIGSILENT PROGRAMSKOM PAKETU

Kako bi se usporedili gubici i stanje u distributivnoj mreži kada se klasični transformatori zamjene amorfnima, modeliran je 20 kV izvod kabelske SN mreže Elektre Karlovac. Prva simulacija biti će izvedena kada su u mreži klasični distributivni transformatori, dok će se u drugoj postojeći zamijeniti s amorfnim transformatorima. Kako su u Republici Hrvatskoj do pisanja ovog diplomskog rada izrađeni samo amorfnim transformatorima snaga 100 i 250 kVA, podaci o amorfnim transformatorima preuzeti su s internetske stranice proizvođača Beijing BANNER Electric Manufacturing Corporation [23]. Podaci su prikazani u tablici 7.2. Podaci o klasičnim transformatorima preuzeti su iz Končarovog priručnika.

Tab. 7.1: Podaci o klasičnim distributivnim transformatorima. [24]

Nazivna snaga [kVA]	Napon			Grupa spoja	Gubici praznog hoda [W]	Gubici tereta [W]	Napon kratkog spoja [%]
	VN [kV]	VN preklopka	NN [kV]				
50	10	±2·2,5%	0,4	Yzn5	190	1050	4
100					320	1750	
160					460	2350	
250				Dyn5	650	3250	
400					930	4600	
630					1300	6500	
1000				6	1750	13500	
1600					2550	19800	
2000 ¹					20	4000	14500

Podaci za klasične transformatore iz tablice 7.1 do 1600 kVA odnose se na uljne transformatore. S obzirom da u katalogu ne postoje podaci za nazivnu snagu 2000 kVA, podaci za tu snagu odnose se na suhi transformator.

Gubici praznog hoda amorfnih transformatora u prosjeku su 70% manji, dok su razlike u gubicima tereta puno manje, ali su smanjeni u odnosu na klasične transformatore. Gubici tereta ovise o

¹ podaci se odnose na suhi transformator

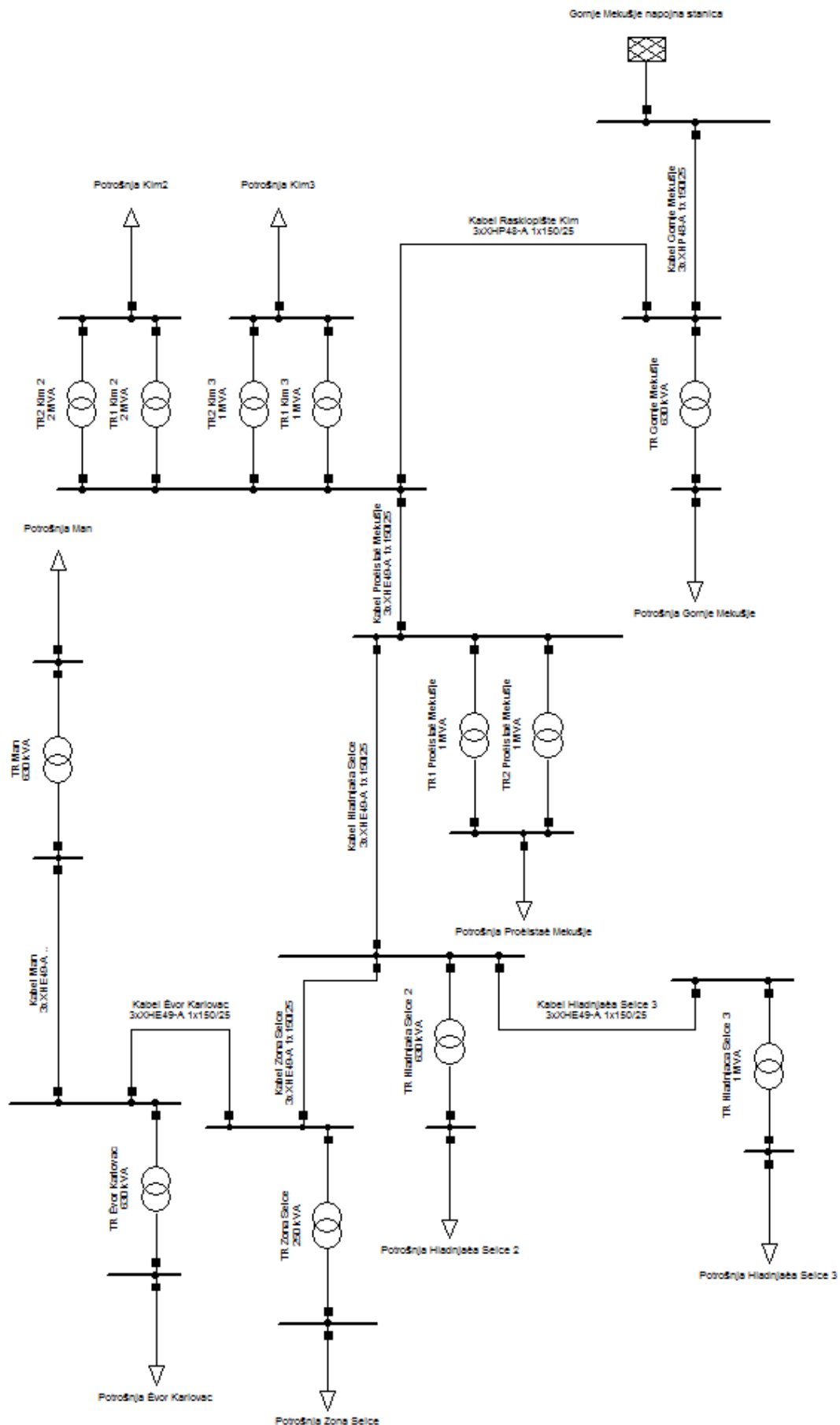
presjeku vodiča i njihovim povećanjem dolazi do smanjenja gubitaka ali nasuprot tome se povećavaju dimenzije i težina transformatora.

Gubici praznog hoda smanjeni su primjenom kvalitetnijeg materijala za jezgru.

Direktnu usporedbu struje magnetiziranja nije moguće izvesti jer ona nije navedena u priručniku za klasične transformatore. Grupa spoja je drugačije izvedena i postoji razlika u naponu kratkog spoja. Amorfni transformator ima kao i klasični, preklopku na VN strani kojom se mijenja prijenosni omjer u beznaponskom stanju.

Tab. 7.2: Podaci o amorfnim transformatorima. [23]

Nazivna snaga [kVA]	Napon			Grupa spoja	Gubici praznog hoda [W]	Gubici tereta [W]	Struja magnetiziranja [%]	Napon kratkog spoja [%]
	VN [kV]	VN preklopka	NN [kV]					
30	6	±2·2,5%	0,4	Dyn Yyn0	33	600	1,7	4
50					43	870	1,3	
63					50	1040	1,2	
80					60	1250	1,1	
100					75	1500	1	
125					85	1800	0,9	
160					100	2200	0,7	
200					120	2600	0,7	
250					140	3050	0,7	
315					170	3650	0,5	
400					200	4300	0,5	
500					240	5150	0,5	
630					320	6200	0,3	4,5
800					380	7500	0,3	
1000					450	10300	0,3	
1250					530	12000	0,2	
1600					630	14500	0,2	5
2000	750	17400	0,2					
2500	900	20200	0,2					



PowerFactory 15.1.6	Izvod mreže Elektre Karlovač	Project: Diplomski
	Diplomski rad Deni Prhal	Graphic: Grid
		Date: 6/26/2017
		Annex:

Sl. 7.1: Model promatrane SN mreže kreiran u DIGSILENT-u.

Model promatrane mreže prikazan je na slici 7.1. Sastoji se od devet 20 kV-nih i devet 0,4 kV-nih sabirnica, 9 potrošača na 0,4 kV razini i 12 transformatora 20/0,4 kV od čega ih 6 radi u paralelnom radu. Izvod se napaja iz TS 35(20)/10 kV Gornje Mekušje (na slici označeno Gornje Mekušje napojna stanica). 20 kV-ne sabirnice povezane su kabelima.

7.1. Postavke simulacije

U tablici 7.3 navedeni su podaci o kabelima. Popis transformatora i njihove nazivne snage navedene su u tablici 7.4, a podaci se za klasične transformatore nalaze u tablici 7.1 dok su u tablici 7.2 navedeni podaci za amorfne transformatore.

Tab. 7.3: Podaci o kabelima promatrane mreže.

Naziv	Opis	Duljina [km]
Kabel Gornje Mekušje	20 kV, 3xXHP48-A 1x150/25	0,53
Kabel Rasklopište Kim	20 kV, 3xXHP48-A 1x150/25	0,73
Kabel Pročistač Mekušje	20 kV, 3xXHE49-A 1x150/25	1,31
Kabel Hladnjača Selce	20 kV, 3xXHE49-A 1x150/25	4,05
Kabel Zona Selce	20 kV, 3xXHE49-A 1x150/25	0,65
Kabel Hladnjača Selce 3	20 kV, 3xXHE49-A 1x150/25	0,03
Kabel Čvor Karlovac	20 kV, 3xXHE49-A 1x150/25	1,52
Kabel Man	20 kV, 3xXHE49-A 1x150/25	0,6

Tab. 7.4: Popis transformatora u promatranoj mreži.

Naziv transformatora	Nazivna snaga [MVA]
TR Gornje Mekušje	0,63
TR1 i TR2 Kim3	1
TR1 i TR2 Kim2	2
TR1 i TR2 Pročistač Mekušje	1
TR Hladnjača Selce 2	0,63
TR Hladnjača Selce 3	1
TR Zona Selce	0,25
TR Čvor Karlovac	0,63
TR Man	0,63

Podaci o potrošačima preračunate su na temelju podataka o postotnom prosječnom dnevnom opterećenju transformatora koji napajaju pripadajućeg potrošača i prikazani su u sljedećoj tablici.

Tab. 7.5: Podaci o potrošačima promatrane mreže.

Naziv potrošača	Snaga [MVA]	Faktor snage
Potrošnja Gornje Mekušje	0,296	0,95 ind.
Potrošnja Kim 3	1,4	
Potrošnja Kim 2	3,6	
Potrošnja Pročistač Mekušje	1,56	
Potrošnja Hladnjača Selce 2	0,567	
Potrošnja Hladnjača Selce 3	0,78	
Potrošnja Zona Selce	0,0925	
Potrošnja Čvor Karlovac	0,289	
Potrošnja Man	0,384	

Nakon modeliranja mreže i unošenja potrebnih podataka, vrše se dvije simulacije, kada su transformatori:

- a) klasični
- b) amorfni.

Na glavnom izborniku pritiskom na opciju *Calculate Load Flow* i odabirom metode *AC Load Flow, balanced, positive sequence* pokreću se simetrični tokovi snaga. Nakon provedenih tokova snaga odabire se funkcija *Output Calculation Analysis* kako bi se dobili rezultati simulacije u tabličnom obliku. Za prikazivanje rezultata korištene su opcije *Total System Summary*, *Edge Elements* i *Complete System Report*.

7.2. Rezultati s klasičnim distributivnim transformatorima

Tab. 7.6: *Naponi 0,4 kV sabirnica s klasičnim distributivnim transformatorima.*

Sabirnica 0,4 kV	Napon [p.u.]
Gornje Mekušje	1,007
Kim 3	0,991
Kim 2	0,989
Pročistač Mekušje	0,985
Hladnjača Selce 3	0,980
Hladnjača Selce 2	0,985
Man	0,991
Zona Selce	0,996
Čvor Karlovac	0,995

Primjećuje se kako električki udaljenije sabirnice od napojne stanice Gornje Mekušje imaju niže napone jer su zbog udaljenosti i većih gubitaka, veći i padovi napona.

Tab. 7.7: *Opterećenja kabela s klasičnim distributivnim transformatorima.*

Kabel	Opterećenje [%]
Gornje Mekušje	76,03
Hladnjača Selce	16,90
Hladnjača Selce 3	6,39
Man	3,12
Pročistač Mekušje	29,16
Rasklopište Kim	73,62
Zona Selce	5,99
Čvor Karlovac	5,39

Ukupni gubici u mreži iznose 165,45 kW pri čemu su:

- a) gubici tereta 142,84 kW
- b) gubici praznog hoda 22,61 kW.

7.3. Rezultati s amorfnim distributivnim transformatorima

Tab. 7.8: *Naponi 0,4 kV sabirnica s amorfnim distributivnim transformatorima.*

Sabirnica 0,4 kV	Napon [p.u.]
Gornje Mekušje	1,006
Kim 3	0,997
Kim 2	0,991
Pročistač Mekušje	0,992
Hladnjača Selce 3	0,987
Hladnjača Selce 2	0,984
Man	0,990
Zona Selce	0,996
Čvor Karlovac	0,994

Iako nema znatnih promjena, dolazi do povećanja napona na sabirnicama koje su električki bliže nadređenoj mreži.

Tab. 7.9: *Opterećenja kabela s amorfnim distributivnim transformatorima.*

Kabel	Opterećenje [%]
Gornje Mekušje	75,74
Hladnjača Selce	16,85
Hladnjača Selce 3	6,35
Man	3,12
Pročistač Mekušje	29,04
Rasklopište Kim	73,33
Zona Selce	5,98
Čvor Karlovac	5,38

Kabeli su opterećeni neznatno manje radi manjih gubitaka transformatora.

Ukupni gubici u mreži iznose 142,03 kW pri čemu su:

- a) gubici tereta 136,85 kW
- b) gubici praznog hoda 5,19 kW.

7.4. Usporedba gubitaka

Ukupni gubici u promatranoj mreži zamjenom klasičnih transformatora amorfnim manji su 23,42 kW. Gubici tereta manji su 6 kW, a gubici praznog hoda 17,42 kW.

Rezultati potvrđuju prednost amorfnih transformatora zbog puno nižih gubitaka u jezgri koji se odražavaju na gubitke praznog hoda koji su smanjeni čak 77%.

Gubici tereta manji su za 4,2% što dovodi do zaključka kako amorfnih transformatori imaju više prednosti u gubicima praznog hoda.

Međutim, treba uzeti u obzir da su podaci za dva klasična transformatora snage 2 MVA uzeti za suhu izvedbu nasuprot ostalim uljnim transformatorima. Prema tim podacima, ispada kako su gubici tereta za tu nazivnu snagu manji nego kod amorfnih transformatora što svakako nije točno usporede li se gubici tereta za ostale nazivne snage. Ta dva transformatora opterećena su 90% i svakako puno doprinose gubicima tereta. Također, nije uzeta u obzir promjena opterećenja tijekom dana već je opterećenje zadano kao prosječno dnevno.

7.4.1. Novčana ušteda

Novčana ušteda koja bi se postigla ugradnjom amorfnih transformatora u promatranom 20 kV izvodu računa se prema izrazu koji je korišten u 6. poglavlju prilikom usporedbe amorfnog i klasičnog transformatora nazivne snage 100 kVA TOC metodom. U ovom slučaju ne uzimaju se u obzir početne cijene transformatore već samo ušteda zbog manjih gubitaka.

Kapitalizacijski faktor za gubitke u praznom hodu računa se prema izrazu 7-1, identično kao u 6. poglavlju:

$$A = 8760 \cdot C_e \cdot F_c \text{ (kn/kW)} \quad (7-1)$$

Kapitalizacijski faktor za gubitke tereta razlikuje se u odnosu na navedeni izraz u 6. poglavlju. U ovom izrazu ne pojavljuje se faktor tereta s obzirom da su opterećenja podešena prema prosječnim dnevnim opterećenjima transformatora. Izraz glasi:

$$B = 8760 \cdot C_e \cdot F_c \text{ (kn/kW)} \quad (7-2)$$

Ukupna ušteda ugradnjom amorfnih transformatora u promatranu mrežu tijekom godina dobiva se izrazom 7-3:

$$U\check{S}T\check{E}D\check{A} = (\Delta P_0 + \Delta P_k) \cdot 8760 \cdot C_e \cdot F_c \text{ (kn/nakon 'n' godina)} \quad (7-3)$$

gdje je:

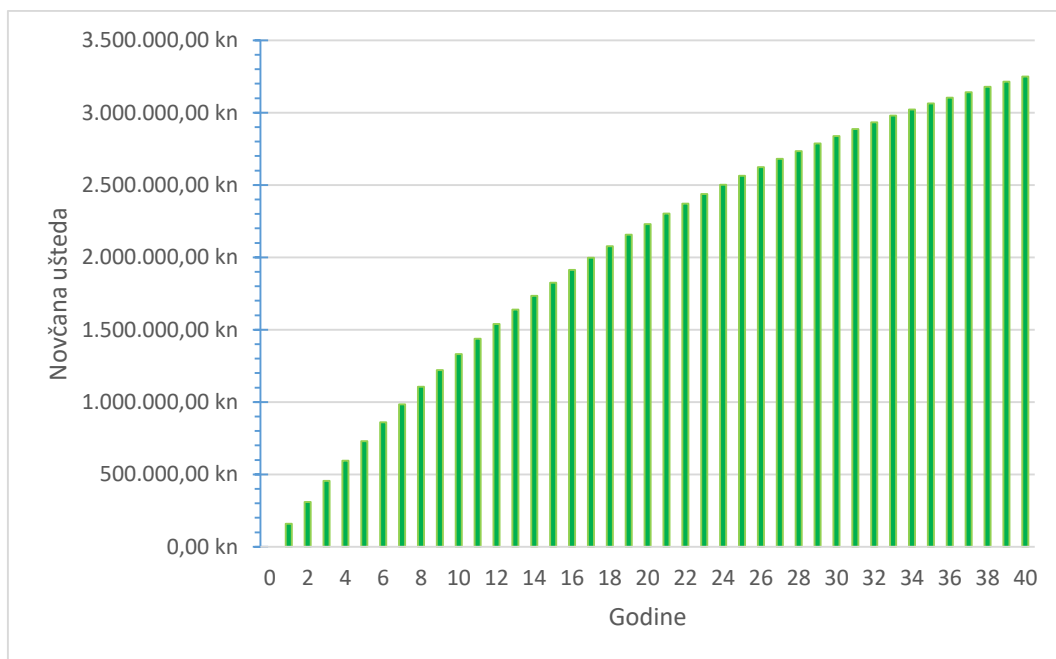
- ΔP_0 razlika gubitaka praznog hoda (kW)
- ΔP_k razlika gubitaka tereta (kW)
- 8760 broj sati u jednoj godini (h)
- C_e cijena električne energije (kn/kWh)
- F_c faktor neto sadašnje vrijednosti.

Cijena električne energije iznosi 0,80 kn/kWh dok se faktor neto sadašnje vrijednosti računa na isti način kao prema izrazu 6-9:

$$F_c = \sum_{k=0}^n \frac{1}{(1+i)^k} = \frac{1}{(1+i)^0} + \frac{1}{(1+i)^1} + \dots + \frac{1}{(1+i)^n} = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \quad (7-4)$$

pri čemu je diskontna stopa $i=0,04$. Radni vijek transformatora procjenjuje se na 40 godina.

U prvoj godini ugradnje ušteda iznosi 157.814,77 kn a nakon 40 godina ušteda iznosi 3.248.535,72 kn.



Grafikon 7.1: Novčana kumulativna ušteda za promatrani izvod ugradnjom amorfnih distributivnih transformatora.

Ugradnja amorfnih transformatora za cijeli promatrani izvod trenutnom zamjenom postojećih ispravnih transformatora u početku zbog veće početne cijene nije isplativa. Međutim, ukoliko bi

se zbog starosti i potrebne zamjene postojeći transformatori morali zamijeniti, amorfni transformatori svakako pružaju bolju opciju zbog nižih troškova gubitaka i ušteda koje tijekom godina radnog vijeka donose. Ušteda bi potencijalno mogla biti još veća, s obzirom da u Republici Hrvatskoj nisu još proizvedeni transformatori svih nazivnih snaga te su korišteni podaci stranog proizvođača dok amorfni transformatori proizvedeni u tvrtki Končar nazivnih snaga 100 i 250 kVA imaju manje gubitke u odnosu na iste od stranog proizvođača.

8. ZAKLJUČAK

Transformatori su jedni od najstarijih elemenata mreže i njihova uloga u elektroenergetskom sustavu je značajna. To su uređaji koji unatoč velikoj korisnosti, značajno doprinose ukupnim gubicima u mreži. Gubici transformatora u željezu postoje dok god je transformator pod naponom, bez obzira bio on opterećen ili ne. Gubici u bakru ovise o kvadratu opterećenju i otporu namota. Napredak postignut u materijalima za izradu jezgre ima značajan utjecaj na uštedu električne energije i okoliš. S obzirom na činjenicu kako je u svijetu sve veća potreba za električnom energijom, uloga učinkovitijih transformatora s manjim gubicima postaje sve veća. Manji gubici u mreži donose niže troškove, ali i smanjuju emisiju stakleničkih plinova zbog proizvodnje električne energije iz neobnovljivih izvora. U svijetu jača svijest o potrebi štednje energije i poboljšanju energetske učinkovitosti u svakom području. Europska unija Uredbom potiče energetske učinkovitije transformatore koji mogu značajno doprinijeti uštedi električne energije. Zakonskom regulativom nameće se maksimalna razina gubitaka za energetske transformatore snaga do 3,15 MVA odnosno minimalna učinkovitost za energetske transformatore snaga većih od 3,15 MVA. Cilj je smanjiti gubitke transformatora u 2 koraka, 1. razinom od 1. srpnja 2015. g. te 2. razinom od 1. srpnja 2021. g. Zakonskom regulativom smanjuju se obje vrste gubitaka. Ipak, veći se naglasak stavlja na smanjenje gubitaka praznog hoda koji se smanjuju primjenom kvalitetnijeg materijala u jezgri pri čemu se ne utječe na dimenzije i težinu transformatora i zbog toga što je prosječni faktor opterećenja distributivnih transformatora oko 20%. Na temelju Uredbe donesen je i novi standard za distributivne transformatore EN50588-1:2015 koji dodatno uvodi razinu gubitaka praznog hoda AAA₀ koja se jedino može postići izradom jezgre transformatora od amorfnih limova. Transformatori s amorfnom jezgrom stvaraju manje gubitke u odnosu na klasične transformatore s magnetski orijentiranim limovima. Njihova glavna odlika su značajno manji gubici praznog hoda, u prosjeku oko 70%. Amorfne metale karakterizira nasumična atomska struktura, vrlo niski specifični gubici i lako magnetiziranje. U odnosu na konvencionalne magnetski orijentirane limove, debljina amorfnih limova iznosi oko 1/10, karakterizira ih manja snaga magnetiziranja i veća električna otpornost. Nedostaci su niža radna indukcija, veća specifična cijena amorfnih metala i kompleksan proces proizvodnje amorfnih limova. Jezgra od amorfnih limova je motana za razliku od klasičnih slaganih jezgara od magnetski orijentiranih limova. Amorfni transformatori imaju veće dimenzije, stvaraju veću buku te im je veća početna cijena. Proizvodnja amorfnih transformatora ograničena je na distributivne transformatore do nekoliko MVA. Unatoč većoj početnoj cijeni, amorfni transformatori imaju manje ukupne troškove tijekom cijelog životnog vijeka. Ekonomskom usporedbom pomoću TOC metode na

primjeru 100 kVA transformatora, ustanovljeno je da su amorfní transformatori ekonomski isplativi tijekom životnog vijeka. Na primjeru 20 kV izvoda mreže Elektre Karlovac, prikazana je ušteda koja bi se ostvarila zamjenom 9 distributivnih postojećih transformatora amorfnim. Ušteda tijekom 40 godina radnog vijeka iznosi 3.248.535,72 kn. Amorfní transformatori nemaju veliku primjenu u europskim okvirima. Proizvodnja amorfnih transformatora vrlo je kompleksna te bi serijska proizvodnja zahtijevala velike promjene u postojećoj tehnologiji kao i problem što u Europi nema proizvođača amorfnog materijala dok je u svijetu dominantan samo jedan proizvođač. Pojavom konkurencije među proizvođačima cijena amorfnog materijala bila bi pristupačnija. Razvojem tehnologije i samog procesa proizvodnje cijena amorfnih transformatora bi se smanjila. U budućnosti bi se trebalo okrenuti ugradnji amorfnih transformatora jer unatoč većoj početnoj cijeni koju imaju, isplativi su tijekom životnog vijeka i smanjuju troškove zbog nižih gubitaka, posebice praznog hoda. Imajući na umu kako će cijena električne energije u budućnosti rasti i kako su distributivni transformatori u većini slučajeva slabo opterećeni, amorfní transformatori imaju još veće prednosti. Proizvodnja i ugradnja amorfnih transformatora mogla bi se poticati, uz već postojeće zakonske okvire i osiguravanjem odgovarajućih poticaja kako bi se nadoknadila veća početna cijena.

LITERATURA

- [1] Z. Maljković, D. Žarko, Osnovna teorija transformatora, dostupno na:
https://www.fer.unizg.hr/download/repository/TESIT_2014_2015_Transformatori1.pdf,
pristup ostvaren 7.3.2017.
- [2] Z. Maljković, Transformatori, dostupno na:
https://www.fer.unizg.hr/download/repository/EEPE_2014_TR1.pdf,
pristup ostvaren 6.3.2017.
- [3] I. Vlajić-Naumovska, Transformatori, dostupno na:
<https://www.viser.edu.rs/download.php?id=19859>,
pristup ostvaren 6.3.2017.
- [4] A. Dolenc, Transformatori, 1. i 2. dio, Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet,
Zagreb, 1991.
- [5] B. Mitraković, Transformatori, Naučna knjiga, Beograd, 1985.
- [6] Z. Maljković, Transformatori, dostupno na:
https://www.fer.hr/download/repository/TESIT_10_TRAFO.pdf, pristup ostvaren
14.3.2017.
- [7] Direktiva 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 21. listopada 2009. o uspostavi
okvira za utvrđivanje zahtjeva za ekološki dizajn proizvoda koji koriste energiju,
dostupno na:
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=celex%3A32009L0125>, pristup
ostvaren 22.1.2017.
- [8] Uredba komisije (EU) br. 548/2014 od 21. svibnja 2014. o provedbi Direktive
2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća u pogledu malih, srednjih i velikih strujnih
transformatora, dostupno na:
[http://eur-lex.europa.eu/legal-
content/HR/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.152.01.0001.01.HRV](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.152.01.0001.01.HRV), pristup ostvaren
22.1.2017.
- [9] Novi zahtjevi za transformatore u Europskoj Uniji (ekološki dizajn), dostupno na:
http://www.koncar-dst.hr/hr/docs/koncardstHR/documents/40/1_0/Original.pdf, pristup
ostvaren 6.3.2017.
- [10] B. Čučić, M. Mikulić, N. Meško, D. Trstoglavac, Distributivni transformatori sa sniženim
gubicima praznog hoda, Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike
elektroenergetske sustave – CIGRÉ, 11. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 2013.

- [11] A. Eliasson, H. Elvfiing, V.R. Ramanan, Amorphous Metal Core Material Shows Economic and Environmental Benefits when Pre-existing Transformers are to be Replaced within Vattenfall Group's Distribution Network, IEEE PES, Oct 2010, Gothenburg
- [12] R. Čučić, I. Dundović, A. Tunjić, Amorfni i regulacijski transformatori, Program uvođenja novih naprednih tehnologija, HEP ODS d.o.o, Zagreb, 2014.
- [13] N. Meško, R. Čučić, S. Tojić, I. Dundović, Amorfni distributivni transformatori, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, 5. (11.) savjetovanje, Osijek, 2016.
- [14] I. Kokanović, Amorfni materijali, Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet
- [15] Seminarski rad: Stablnost i kristalizacija amorfni legura gvožđa, Nove fizičko-hemijske metode, 2009
- [16] H. W. Ng, R. Hasegawa, A.C. Lee, L. Lowdermilk, Amorphous Alloy Core Distribution Transformers, IEEE, 11, 79, studeni 1991.
- [17] N. DeCristofaro, Amorphous Metal in Electric-Power Distribution Applications, Materials Research Society, MRS Bulletin, 5, 23, str. 50-56, 1998
- [18] M. Mohan, An Overview on Amorphous Core Transformer, Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS) 3 (2): str. 217-220, Scholarlink Research Institute Journals, 2012.
- [19] Y. Ogawa, M. Naoe, Y. Yoshizawa, R. Hasegawa, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 304 (2006) e675–e677, ožujak 2006.
- [20] R. Hasegawa, D. Azuma, Impacts of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320 (2008) 2451–2456, 15. travanj 2008.
- [21] A. Najafi, I. Iskender, B. Dokmetas, Impacts of amorphous core to reduce the losses in distribution transformer based on time stepping finite element method, International Journal on „Technical and Physical Problems of Engineering“ (IJTPE), 3, 7, str. 53-57, rujan 2015.
- [22] A. J. Moses, Iron - based amorphous ribbon – challenges and opportunity for power applications, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2, 4, str. 231-236, lipanj 2002
- [23] SBH15-M Amorphous Alloy Distribution transformer, dostupno na: <http://www.bjbanner.com.cn/en/Products/Transformer/2014/0522/275.html>, pristup ostvaren 14.6.2017.
- [24] Končar katalog, peto izdanje, Tisak „A.G. Matoš“, Samobor, 1991.

- [25] R. Saini, Amorphous core Transformer, dostupno na: <https://www.slideshare.net/rakeshsaini58/amorphous-core-transformer>, pristup ostvaren 21.6.2017.
- [26] G. Loizos, T. Souflaris, P. Lagache, I. Gokcen, M. Sacotte, Amorphous metal-based distribution transformer: evaluation of the current technology situation and a proposed design for short-circuit withstand, CIGRE, 2012
- [27] K. Tačković, H. Glavaš, I. Petrović, Energetska učinkovitost transformatora, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, 4. (10.) savjetovanje, Trogir/Seget Donji, 2014.
- [28] B. Nikolić, I. Dundović, M. Pisačić, M. Šporec, Implementacija amorfno transformatora, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, 5. (11.) savjetovanje, Osijek, 2016.
- [29] M. Rycroft, Amorphous core material offers lower losses for distribution transformers, dostupno na: <http://www.ee.co.za/article/amorphous-core-material-offers-lower-losses-distribution-transformers.html>, pristup ostvaren 21.6.2017.

SAŽETAK

U ovom radu opisana je fizikalna slika rada transformatora, struja magnetiziranja koja je potrebna da bi se uzbudilo magnetsko polje u jezgri i gubici koji nastaju pri radu transformatora. Dan je pregled zakonske regulative u pogledu energetske učinkovitosti transformatora. Opisani su transformatori s jezgrom od amorfnih limova, način proizvodnje i njihove karakteristike. Amorfní transformatori postižu niže gubitke u odnosu na klasične transformatore s magnetski orijentiranim limovima, posebice u gubicima praznog hoda. Izvršena je ekonomska usporedba pomoću TOC metode kojom je utvrđeno da su ekonomski isplativi tijekom životnog vijeka unatoč veće početne cijene. Na osnovu simulacijskog modela izvoda mreže Elektre Karlovac u programskom paketu DIgSILENT izvršena je analiza zamjene postojećih 20/0,4 kV transformatora. Gubici u mreži smanjeni su 23,42 kW. Amorfní transformatori imaju višu početnu cijenu ali donose uštedu zbog manjih troškova gubitaka.

Ključne riječi: transformator s amorfnom jezgrom, gubici transformatora, gubici praznog hoda, energetska učinkovitost

ABSTRACT

Title: Energy efficient transformers with amorphous alloy core

This paper describes physical image of transformer work, magnetising current which is needed for creating magnetic field in core and losses which occur when transformer is working. An overview of legislation about energy efficiency of transformer is provided. Amorphous alloy core transformer, mode of production and their characteristics are described. Amorphous alloy core transformers have less losses in comparison with conventional grain oriented silicon steel transformer, especially no-load losses. Economic comparison with TOC method was done and it has been found that amorphous alloy core transformers are economically viable in despite of bigger initially price. Analysis of replacement of existing 20/0,4 kV transformers with help of the simulation model of network excerpt Elektra Karlovac in software package DIgSILENT was carried out. Losses in the network are reduced by 23,42 kW. Amorphous alloy core transformers have higher initially prices but make savings because of lower cost of losses.

Keywords: transformer with amorphous alloy core, transformer losses, no-load losses, energy efficiency

ŽIVOTOPIS

Deni Prhal rođen je 23. rujna 1993. u Virovitici. Završio je Češku osnovnu školu Josipa Ružičke u Končanici. Zatim upisuje Tehničku školu u Daruvaru, smjer elektrotehnika koju završava 2012. godine s odličnim uspjehom u sva četiri razreda. Iste godine, nakon završene srednje škole i položene državne mature upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijeku i na drugoj godini se opredjeljuje za smjer Elektroenergetika. U srpnju 2015. godine završava studij s vrlo dobrim uspjehom s temom završnog rada „Autonomni regulirani naponski izmjenjivač 9V/230V, 50Hz, 300VA upravljani s pomoću integriranog kruga KA3525A“. Nakon toga, iste godine upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, modul Elektroenergetski sustavi. Odlično govori i piše češki jezik. Tijekom školovanja stekao je znanje engleskog i njemačkog jezika, ali na nižoj razini znanja pisanja i govora. Stekao je znanje rada na računalu s operacijskim sustavom Windows i korištenje Microsoft Office paketa. Ima iskustva s radom u programskom jeziku C++ te programskim paketima Multisim, AutoCAD, Matlab, DIgSILENT, PowerWorld i Easy Power. Aktivno se bavi nogometom i glazbom.