Broj rada: R1-02
DOI:10.46793/CIRED2026.R1-02_123

TEHNIČKO-EKONOMSKA ANALIZA PRIMENE ALUMINIJUMSKIH I BAKARNIH NAMOTAJA U DISTRIBUTIVNIM TRANSFORMATORIMA

TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE APPLICATION OF ALUMINUM AND COPPER WINDINGS IN DISTRIBUTION TRANSFORMERS

Saša JOVIĆ, Elektrodistribucija Srbije doo, Srbija *
Radeta MARIĆ, Elektrodistribucija Srbije doo, Srbija
Branko JAKŠIĆ, Elektrodistribucija Srbije doo, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Centralna tema ovog rada je komparativna analiza upotrebe aluminijuma (Al) i bakra (Cu) kao osnovnih materijala za izradu namotaja distributivnih transformatora. Iako je bakar tradicionalni izbor zbog vrhunske električne provodljivosti, mehaničke čvrstoće, nestabilnost tržišnih cena i potreba za optimizacijom troškova nameću aluminijum kao sve zastupljeniju alternativu. Rad ispituje direktan uticaj specifične provodljivosti materijala na fizičke dimenzije uređaja. Zbog slabije provodljivosti aluminijuma (oko 61% provodljivosti bakra), aluminijumski namotaji zahtevaju veći poprečni presek, što rezultira povećanjem ukupnih gabarita transformatora (veći prozor jezgra, veći sud i veća količina izolacionog ulja), ali uz značajno manju ukupnu masu samih namotaja. Kad su pitanju termičke i mehaničke karakteristike analizirano je ponašanje oba materijala u uslovima kratkog spoja i dugotrajnog termičkog opterećenja, uzimajući u obzir različite koeficijente toplotnog širenja. Izvršeno je detaljno poređenje troškova proizvodnje. Fokus je stavljen na odnos cena/kvalitet, niža cena sirovog aluminijuma naspram povećanih troškova za ostale materijale (jezgro, ulje, trafo sud) koje nameću veći gabariti. Istraživanje pokazuje da transformatori sa aluminijumskim namotajima mogu pružiti identične radne karakteristike i pouzdanost kao i bakarni, uz uštede u nabavnoj ceni koje se kreću od 15% do 30%, uprkos većim dimenzijama. Zaključuje se da izbor materijala zavisi od specifičnih zahteva lokacije ugradnje (prostorna ograničenja) i trenutnog odnosa cena sirovina na svetskom tržištu.

Ključne reči: aluminijumski namotaji, bakarni namotaji, distributivni transformatori, ekonomska isplativost, gubici snage.

ABSTRACT

The central theme of this presentation is a comparative analysis of the use of aluminum (Al) and copper (Cu) as basic materials for the manufacture of distribution transformer windings. Although copper is the traditional choice due to its superior electrical conductivity, mechanical strength, instability of market prices and the need for cost optimization impose aluminum as an increasingly popular alternative. The paper examines the direct impact of the specific conductivity of the material on the physical dimensions of the device. Due to the lower

* Saša Jović, sasa.jovic@es.rs; Radeta Marić, radeta.maric@es.rs; Branko Jakšić, branko.jaksic@es.rs

conductivity of aluminum (about 61% of the conductivity of copper), aluminum windings require a larger cross-section, which results in an increase in the overall dimensions of the transformer (larger core window, larger vessel and greater amount of insulating oil), but with a significantly lower total mass of the windings themselves. In according to the behavior of both materials under short circuit and long-term thermal load conditions is analyzed, taking into account different thermal expansion coefficients. A detailed comparison of production costs is performed. The focus is on the price/quality ratio, lower raw aluminum price versus increased costs for other materials (core, oil, transformer tank) imposed by larger dimensions. Research shows that transformers with aluminum windings can provide identical operating characteristics and reliability as copper ones, with savings in purchase price ranging from 15% to 30%, despite larger dimensions. It is concluded that the choice of material depends on the specific requirements of the installation location (space constraints) and the current ratio of raw material prices on the world market.

Keywords: aluminum windings, copper windings, distribution transformers, economic profitability, power losses.

UVOD

Za sagledavanje upotrebe materijala provodnika (bakarni ili aluminijumski namotaji) u distributivnim trasnformatorima, neophodno je da pored poređenja ekonomskih pokazatelja, obratimo pažnju i na poređenje dimenzija distributivnih transformatora x/0,4 kV (ET) jer se značajan broj distributivnih transformatora montira u već postojećim transformatorskim stanicama. Ovo se odnosi i na slučajeve na stubnim transformatorskim stanicama (STS) i u montažno-betonskim transformatorskim stanicama (MBTS).

ANALIZA GABARITA DISTRIBUTIVNIH TRANSFORMATORA

Analiziraćemo transforamtore koji se koriste u montažno-betonskim transfostanicama, a to su najčešće snage 630 kVA i 1000 kVA

1.1 Distributivni transformatori snage 630 kVA

A) Transformator snage 630 kVA sa Cu namotajima, gubici su u skladu sa TIR 2[1]. ($P_0 \leq 540$ W; $P_{ks} \leq 4600$ W)
Gabariti transformatora sa gubicima koji su u skladu sa TIR 2 ($P_0 \leq 540$ W; $P_{ks} \leq 4600$ W) su: Š99 × V174 sve ±1 cm – takođe navedeni u prvoj koloni Tabele I.
Upoređujući vrata MBTS, kao i transformatorskog boksa, zaključuje se da transformator 630 kVA 10/0,4 kV sa Cu namotajima i sa gubicima u skladu sa TIR 2 može da se smesti u MBTS, a samim tim u svim standardnim transformatorskim stanicama u zgradama.

B) Transformator snage 630 kVA sa Cu namotajima, starije konstrukcije sa sniženim gubicima, većim od gubitaka definisanih TIR-om 2. ($P_0 \leq 860$ W; $P_{ks} \leq 5400$ W)
Gabariti transformatora starije konstrukcije sa sniženim gubicima a većim od TIR 2 ($P_0 \leq 860$ W; $P_{ks} \leq 5400$ W) su: Š89 x V170 cm – takođe navedeni u drugoj koloni Tabele I.
Upoređujući vrata MBTS, kao i transformatorskog boksa, zaključuje se da transformator 630 kVA 10/0,4 kV sa Cu namotajima i sa sniženim gubicima može da se smesti u MBTS do 2×1000 kVA, a samim tim u svim standardnim transformatorskim stanicama u zgradama. Transformator snage 630 kVA 10/0,4 kV nije kritičan za smeštaj u MBTS, a ni u transformatorskim stanicama u zgradama.

[1]*TIR 2 definisan je Pravilnikom o zahtevima eko-dizajna za energetske trasnformatore (u tabelama u Pravilniku su navedenene vrednosti gubitaka u kolonama „nivo2"*

C) Transformator snage 630 kVA sa Al namotajima, gubici su u skladu sa TIR 2. (P_0≤540 W; P_{ks} ≤4600 W)

Gabariti transformatora sa gubicima u skladu sa TIR 2 (P_0≤540 W; P_{ks} ≤4600 W) su: Š103±1 × V170±1 cm – takođe navedeni u trećoj koloni Tabele I.

Upoređujući vrata MBTS, kao i transformatorskog boksa, zaključuje se da transformator 630 kVA 10/0,4 kV sa Cu namotajima i sa sniženim gubicima može da se smesti u MBTS, a samim tim u svim standardnim transformatorskim stanicama u zgradama. Ovde vidimo da je transformatora snage 630 kVA sa Al namotajima znatno širi od ekvivalntnog transformatora sa Cu namotajima.

Tabela I – Poredbena rekapitulacija gabarita (u mm) distributivnih transformatora snage 630 kVA i vrata MBTS

	630 kVA Cu-nam. TIR2	630 kVA Cu-nam. sa sniž.gub	630 kVA Al-nam. TIR2
Širina TR	945	890	1030
Visina TR	1700	1700	1700
Vrata TS	1510 × 2360 /1560 × 2360	1510 × 2360 / 1560 × 2360	1510 × 2360 / 1560 × 2360
Zaključak	ok	ok	ok

Transformator snage 630 kVA 10/0,4 kV (u bilo kojoj izvedbi) nije kritičan za smeštaj u MBTS, a ni u transformatorskim stanicama u zgradama kako je to prikazano u Tabeli I.

1.2 Distributivni transformatori snage 1000 kVA

A) Transformator snage 1000 kVA sa Cu namotajima, gubici TIR 2. (P_0≤693 W; P_{ks} ≤7600 W)

Gabariti transformatora sa gubicima koji su u skladu sa TIR 2 (P_0≤693 W; P_{ks} ≤7600 W) su: Š101±1 × V191±1 cm – takođe navedeni u prvoj koloni Tabele II.

Upoređujući vrata MBTS, kao i transformatorskog boksa, zaključuje se da transformator 1000 kVA 10/0,4 kV sa Cu namotajima, sa gubicima u skladu sa TIR2 može da se smesti u MBTS, a samim tim u svim standardnim transformatorskim stanicama u zgradama. Transformator snage 1000 kVA 10/0,4 kV nije kritičan za smeštaj u MBTS, a ni u transformatorskim stanicama u zgradama.

B) Transformator snage 1000 kVA sa Cu namotajima, starije konstrukcije sa sniženim gubicima, većim od gubitaka definisanih TIR-om 2. (P_0≤1100 W; P_{ks} ≤9500 W)

Gabariti transformatora 1000 kVA sa Cu namotajima, starije konstrukcije sa sniženim gubicima a većim od TIR 2 (P_0≤1100 W; P_{ks} ≤9500 W) su: Š92 × V177 cm – takođe navedeni u prvoj koloni Tabele II.

Upoređujući vrata MBTS, kao i transformatorskog boksa, zaključuje se da transformator 1000 kVA 10/0,4 kV sa Cu namotajima, starije konstrukcije sa sniženim gubicima, može da se smesti u MBTS, a samim tim u svim standardnim transformatorskim stanicama u zgradama. Transformator snage 1000 kVA 10/0,4 kV nije kritičan za smeštaj u MBTS, a ni u transformatorskim stanicama u zgradama.

C) Transformator snage 1000 kVA sa Al namotajima, gubici TIR 2. (P_0≤693 W; P_{ks} ≤7600 W)

Gabariti transformatora sa gubicima u skladu sa TIR 2 (P_0≤693 W; P_{ks} ≤7600 W) su: Š11,5±1 × V197,5±1 cm – takođe navedeni u prvoj koloni Tabele II.

Upoređujući vrata MBTS, kao i transformatorskog boksa, zaključuje se da transformator 1000 kVA 10/0,4 kV sa Cu namotajima, sa gubicima u skladu sa TIR2 može da se smesti u MBTS, a samim tim u svim standardnim transformatorskim tanicama u zgradama.

Tabela II – Poredbena rekapitulacija gabarita (u mm) distributivnih transformatora snage 1000 kVA i vrata MBTS

	1000 kVA Cu-nam. TIR2	1000 kVA Cu-nam. sa sniž.gub	1000 kVA Al-nam. TIR2
Širina TR	1010	920	1150
Visina TR	1910	1970	1970
Vrata TS	1510 × 2360 /1560 × 2360	1510 × 2360 / 1560 × 2360	1510 × 2360 / 1560 × 2360
Zaključak	ok	ok	ok

Transformator snage 1000 kVA 10/0,4 kV nije kritičan za smeštaj u MBTS, a ni u transformatorskim stanicama u zgradama kako je to prikazano u Tabeli II.

2 Анализа тежина и габарита трансформатора 160 kVA, 250 kVA i 400 kVA

Analizom težina obuhvatićemo transformatore sa bakarnim i aluminijumskim namotajima, koji se montiraju na stubu, tj. kao deo STS-a. Narednim tabelama pokazaćemo težine različitih proizvođača.

Domaći proizvođač transformatora, ET novije konstrukcije – TIR2

Tabela III – Tabelarni prikaz gabarita i težina distributvnih transformatora domaćeg proizvođača

Snaga/gabariti	dužina	širina	visina	Masa ukupna	Masa ulja	Materijal namotaja
160 kVA 10/0,4 kV	840	800	1540	785	175	Al
250 kVA 10/0,4 kV	1060	840	1640	1220	285	Al
400 kVA 10/0,4 kV	1330	7550	1760	1925	320	Cu

Inostrani proizvođač transforamtora, novije konstrukcije – TIR2

Tabela IV – Tabelarni prikaz gabarita i težina distributvnih transformatora inostranog proizvođača

Snaga/gabariti	dužina	širina	visina	Masa ukupna	Masa ulja	Materijal namotaja
160 kVA 10/0,4 kV	1065	760	1390	815	195	Al
250 kVA 10/0,4 kV	1080	900	1640	1145	260	Al
400 kVA 10/0,4 kV	1510	795	1630	1780	305	Cu

Domaći proizvođač transformatora, ET starije konstrukcije

Tabela V – Tabelarni prikaz gabarita i težina distributvnih transformatora domaćeg proizvođača

Snaga/gabariti	dužina	širina	visina	Masa ukupna	Masa ulja	Materijal namotaja
160 kVA 10/0,4 kV	1010	590	1400	810	160	Cu
250 kVA 10/0,4 kV	1070	770	1450	1050	195	Cu
400 kVA 10/0,4 kV	1370	880	1570	1480	250	Cu

Inostrani proizvođač transforamtora, ET starije konstrukcije

Tabela VI – Tabelarni prikaz gabarita i težina distributvnih transformatora inostranog proizvođača

Snaga/gabariti	dužina	širina	visina	Masa ukupna	Masa ulja	Materijal namotaja
160 kVA 10/0,4 kV	985	710	1315	835	165	Cu
250 kVA 10/0,4 kV	1155	870	1400	1005	195	Cu
400 kVA 10/0,4 kV	1300	820	1585	1355	240	Cu

Poređenjem dimenzija i težina dolazimo do zaključka da su transformatori sa TIR2 gubicima, teži za oko 10-25% u zavisnosti od toga koja snaga je u pitanju (za transforamtore 160 kVA čak i lakši. Isto važi i za gabarite, kako je to prikazano u Tabeli III, Tabeli IV, Tabeli V i Tabeli VI. Jasno je da za transformatore 400 kVA, neophodno da se uradi detaljnija analiza, da li je moguće takav transformator montirati na stub, kao deo STS.
Smatramo da se transformatori manjih snaga mogu bez problema montirati na stub kao deo STS-a.

3. ANALIZA CENE GUBITAKA I ISPLATIVOSTI ET-a

Tabela VII – Karakteristike 400,630 i 1000 kVA transformatora starije konstrukcije

Transformator	Gubici u PH (kW)	Gubici u KS (kW)	Ukupni gubici	ŋ – Stepen iskorišćenja	Procenat opterećenja μ- prosečno	Ukupni gubici usled prosečnog opterećenja (kW) $P=P_{ph}+ŋ^2\ \mu^2 P_{ks}$
400 kVA	0,61	3,85	4,46	97,79%	55,00%	1,724
630 kVA	0,86	5,4	6,26	96,89%	55,00%	2,393
1000 kVA	1,1	9,5	10,6	94,70%	55,00%	3,677

Napomena 1: ŋ – 400kVA - 97,778%;630kVA - 96,885%; 1000kVA - 94,700%; - izračunato

Tabela VIII – Karakteristike novih 400,630 i 1000 kVA transformatora sa sniženim gubicima TIR 2

Transformator	Gubici u PH (kW)	Gubici u KS (kW)	Ukupni gubici	ŋ - Stepen iskorišćenja	Procenat opterećenja μ- prosečno	Ukupni gubici usled prosečnog opterećenja (kW) $P=P_{ph}+ŋ^2\ \mu^2 P_{ks}$
400 kVA	0,387	3,25	3,637	99,37%	55,00%	1,358
630 kVA	0,54	4,6	5,14	99,44%	55,00%	1,916
1000 kVA	0,693	7,6	8,293	99,48%	55,00%	2,968

Napomena 1: ŋ – 400 kVA - 99,369%;630 kVA - 99,437%; 1000 kVA - 99,484 %; -tablica TIR 2

Na bazi navedenih podataka prikazanih u Tabeli VII i Tabeli VIII, razlika ukupniih gubitaka u transformatoru pri prosečnom opterećenju od 55% je prikazana u Tabeli IX.

Tabela IX – Razlika gubitaka za različite snage 400,630 i 1000 kVA transformatora

Transformator	Ukupni gubici usled prosečnog opterećenja starog transformatora (kW)	Ukupni gubici usled prosečnog opterećenja novog transformatora (kW)	**Razlika u gubicima po komadu (kW)**
400 kVA	0,610	0,387	**0,366**
630 kVA	0,860	0,540	**0,477**
1000 kVA	1,100	0,693	**0,709**

Elektrodistribucija trenutno plaća gubitke po ceni od 70€/MWh ili 0,07€/kWh. Ukoliko bi se stari transformatori zamenili novim sa gubicima u skladu sa TIR 2, nastala bi razlika u utrošenoj električnoj energiji za pokrivanje gubitaka u transformatoru, što je prikazano u Tabeli X.

Tabela X – Ušteda gubitaka po snazi transformatora u evrima

Transformator	Razlika u gubicima (kW)	Cena gubitaka po kWh (€)	Ušteda energije na dnevnom nivou €/dan	Ušteda energije na godišnjem nivou €/godina	Ušteda energije na nivou životnog veka (od 25 godina) €
400 kVA	0,366	0,07	0,61	224,39	5.609,87
630 kVA	0,477	0,07	0,80	292,66	7.316,43
1000 kVA	0,709	0,07	1,19	434,69	10.867,32

Kada uporedimo cenu transformatora, kao i uštedu na godišnjem nivou prema snazi transformatora, dobijamo podatke opravdanosti investicije u nabavku i ugradnju novih energetskih transformatora sa sniženim gubicima, kako je prikazano u Tabeli XI.

Tabela XI – Tehno-ekonomska analiza

Transformator	cena ET (€)/kom Cu namotaji	cena ET (€)/ kom Al namotaji	Broj godina potrebnih za nov ET sa Al namotajima (zbirno 10 kom ET sa TIR 2 gubicima)	Broj godina potrebnih za ET sa Cu namotajima (zbirno 10 kom ET sa TIR 2 gubicima)
400 kVA	22.732,28	18.913,00	8,43	10,13
630 kVA	30.598,87	25.640,00	8,76	10,45
1000 kVA	44.486,42	35.878,00	8,25	10,23

Tehno-ekonomskom analizom, dobijamo da kupovinom transformatora sa TIR 2 (što smo i obavezni od februara 2024):

- deset transformatora sa TIR 2 gubicima, za oko 8 godina zarađuju po jedan nov transformator sa TIR 2 gubicima sa Al namotajima.
- deset transformatora sa TIR 2 gubicima, za oko 10 godina zarađuju po jedan nov transformator sa TIR 2 gubicima sa Cu namotajima.

Ukoliko se cena gubitaka poveća, period „zarađivanja" na osnovu uštede u gubicima - smanjiće se a time će se povećati ukupna isplativost. Ukoliko se procenat opterećenja poveća, period „zarađivanja" na osnovu uštede u gubicima takođe će se smanjiti, a time će se povećati ukupna isplativost.

Ukoliko se opterećenje transformatora oko nominalnog situacija je sledeća:

Tabela XII – Tehno-ekonomska analiza ukoliko su transformatori nominalno opterećeni

Transformator	cena ET (€) Cu namotaji	cena ET (€) Al namotaji	Broj godina potrebnih za ET sa Al namotajima (zbirno 10 kom ET sa TIR 2 gubicima)	Broj godina potrebnih za ET sa Cu namotajima (zbirno 10 kom ET sa TIR 2 gubicima)
400 kVA	22.732,28	18.913,00	3,75	4,5
630 kVA	30.598,87	25.640,00	3,73	4,55
1000 kVA	44.486,42	35.878,00	2,54	3,14

Deset transformatora (snage 400 kVA i 630 kVA) sa TIR 2 gubicima, za manje od četri godine (1000 kVA za dve i po godine) zarađuju po jedan nov transformator sa TIR 2 gubicima sa Al namotajima, ukoliko je opterećenje transformatora oko nominalnog kako je prikazano Tabelom XII.

Deset transformatora (snage 400 kVA i 630 kVA) sa TIR 2 gubicima, za četri godine i šest meseci (dok za ET snage 1000 kVA za tri godine) zarađuju po jedan nov transformator sa TIR 2 gubicima sa Cu namotajima, na osnovu uštede na smanjenim gubicima ukoliko je opterećenje transformatora oko nominalnog kako je prikazano Tabelom XII.

Trenutno, nemamo iskustva sa transformatorima sa Al namotajima, koliko su otporni na kratke spojeve u dužem vremenskom periodu. Naročito je to problem u gradskim sredinama, gde ima dosta kratkih spojeva (usled kidanja kablova) prilikom zemljanih radova na vodovodnim instalacijama, toplovodnim instalacijama, zemljanih radova prilikom rekonstrukcije saobraćajnica.

4. ANALIZA MATERIJALA

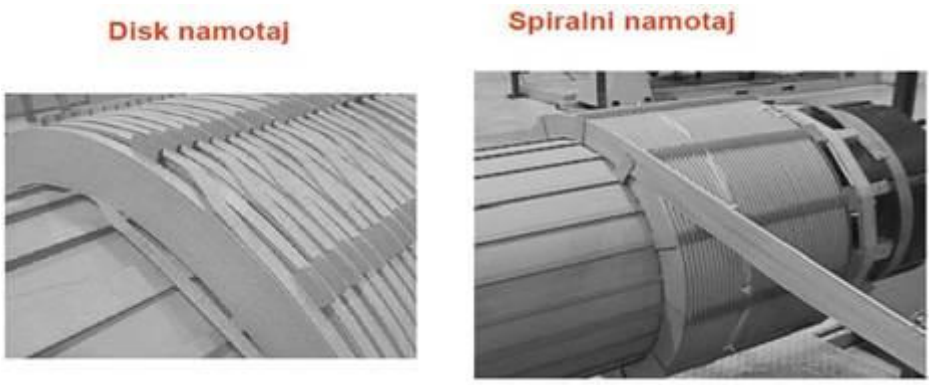
Naprezanja u osnovi možemo da svrstamo u tri glavne grupe: električna, mehanička i toplotna. Blok-namotaji su poznati i kao disk-namotaji, koriste se prvenstveno kod visokonaponskih (VN) i energetskih transformatora velikih snaga.

4.1 Karakteristike i upotreba blok-namotaja

Blok namotaji su dizajnirani da obezbede pouzdanost i efikasnost u zahtevnim uslovima rada, posebno u elektroenergetskom sistemu-što je u našem interesu.
Njihove prednosti su navedene u nastavku.

- Mehanička čvrstoća: ova konstrukcija nudi bolju mehaničku otpornost na sile kratkog spoja u poređenju sa nekim drugim tipovima namotaja.
- Raspodela napona: blok namotaji omogućavaju bolju kontrolu raspodele napona unutar namotaja, što je važno za otpornost na prenapone (npr. usled atmosferskih pražnjenja).
- Primena: posebno su bitni kod transformatora velikih snaga.

- Kod distributivnih transformatora prednost je u mehaničkoj čvrstoći, raspodeli napona, boljem hlađenju i boljoj otpornosti na kratke spojeve.
- Izgled namotaja je: dat na Slici 1.



Slika 1 – Izgled disk i spiralnog namotaja

Ukratko, blok-namotaji su robusna rešenja koja se koriste kod transformatora radi obezbeđivanja mehaničke stabilnosti, efikasnog hlađenja i pouzdane izolacije.

4.2 Cilindrični namotaji

Cilindrični namotaji su jedan od osnovnih oblika namotaja koji se koriste u transformatorima, a karakteriše ih koncentričan raspored oko magnetskog jezgra. Ovaj tip namotaja se često primenjuje kod distributivnih transformatora, naročito za niskonaponske (NN) namotaje. Cilindrični namotaji se razlikuju od blok (disk) namotaja po svojoj jednostavnijoj, slojevitoj strukturi.

- Konstrukcija: namotaji se postavljaju koncentrično oko jezgra, pri čemu se obično najpre postavlja namotaj nižeg napona, zatim izolacija, pa preko nje namotaj višeg napona, provodnici su tipično izolovani lakom ili papirom, zavisno od naponskog nivoa i tipa hlađenja.

Prednost im leži u:

- Jednostavnost izrade: lakši su za mašinsko namotavanje u poređenju sa složenijim strukturama.
- Primena: cilindrični namotaji su uobičajeni kod transformatora za distribuciju električne energije.

Ukratko, cilindrični namotaji su jednostavna i efikasna konstrukcija koja se pretežno koristi u transformatorima manje i srednje snage, gde su mehanička naprezanja manja u poređenju sa onima u velikim energetskim mrežama.

4.3 Folijski namotaji

Upotreba folije (trake) kao materijala za namotaje transformatora predstavlja modernu tehnologiju, koja se značajno razlikuje od tradicionalnih rešenja sa bakarnom žicom ili provodnicima okruglog/pravougaonog preseka.

4.3.1 Karakteristike i prednosti folija namotaja

Folija namotaji se najčešće prave od široke i tanke trake bakra ili aluminijuma. Ova tehnologija nudi niz prednosti, naročito u segmentu transformatora manjih i srednjih snaga, kao i u aplikacijama gde je bitna efikasnost i veličina:

- Veća gustina struje i bolje hlađenje: zbog velike površine trake, toplota se efikasnije prenosi na okolno ulje. Ovo omogućava korišćenje veće gustine struje (više ampera po kvadratnom milimetru preseka) u poređenju sa žičanim namotajima, što rezultira manjim transformatorima za istu snagu.
- Minimalizacija Skin efekta: kod visokih frekvencija, struja teži da teče samo po spoljašnjoj površini provodnika (skin efekat). Tanke trake folije imaju mnogo veći odnos površine i preseka od žice, čime se ovaj neželjeni efekat minimizira, smanjujući gubitke snage.
- Bolje popunjavanje prostora: folija omogućava visok faktor punjenja provodnikom u prozoru jezgra, smanjujući „prazan“ prostor koji zauzima izolacija i vazduh.
- Veća mehanička čvrstoća: trake se čvrsto namotavaju, stvarajući robustnu strukturu koja je otpornija na aksijalne sile kratkog spoja u poređenju sa nekim drugim tipovima namotaja.

4.3.2 Primena

Folija namotaji se sve više koriste u transformatorima srednjeg napona i snage, posebno tamo gde je potrebno smanjiti ukupne dimenzije.

Ukratko, folijski namotaji su tehnologija koja nudi značajne prednosti u efikasnosti, hlađenju i kompaktnosti transformatora u odnosu na tradicionalne metode sa žicom.



Slika 2 – cilindrični, sporalni i folijski namotaji

4.4. Izbor materijala bakar ili aluminijum:

Izbor između bakarnih i aluminijumskih namotaja zavisi od specifičnih prioriteta: cene, težine, efikasnosti i primene transformatora. Ne postoji jednostavan odgovor "bolji je", već zavisi od toga koji su kriterijumi za odabir transformatora.
Sledi poređenje ključnih faktora:

- Bakar (Cu): Bakar je superioran provodnik. Ima značajno manju specifičnu otpornost od aluminijuma. Da bi se postigao isti električni otpor (a time i isti gubici snage), aluminijumski provodnik mora imati presek otprilike 1,6 do 1,8 puta veći od bakarnog.
- Aluminijum (Al): Za istu snagu i efikasnost, aluminijumski namotaj je fizički veći i zauzima više prostora u prozoru jezgra.

Prednost po pitanju efikasnosti je na strani bakra.

- Aluminijum (Al): Aluminijum je mnogo lakši materijal, iako aluminijumski namotaj mora biti veći po zapremini da bi odgovarao bakarnom, on će i dalje biti lakši od ekvivalentnog bakarnog namotaja (tipično oko 50% lakši za istu provodnost).
- Bakar (Cu): Teži je.

Prednost po pitanju težine je na strani aluminijuma.

- Aluminijum (Al): Sirovi materijal je znatno jeftiniji i cena mu je stabilnija od bakra. Ovo je glavni razlog zašto mnogi proizvođači koriste aluminijum, naročito kod folijskog namotaja.
- Bakar (Cu): Cena bakra je viša i podložnija je fluktuacijama na svetskom tržištu.

Prednost po pitanju cene je na strani aluminijuma.

- Bakar (Cu): Bakar je mehanički čvršći materijal i ima bolju otpornost na deformaciju pod konstantnim pritiskom tokom vremena, naročito na povišenim temperaturama). Lakše se spaja (lemi, vari).
- Aluminijum (Al): Mekši je i zahteva posebne metode spajanja (specijalne stezaljke ili hladno zavarivanje) jer se ne lemi lako standardnim metodama, što može dovesti do labavljenja spojeva tokom vremena ukoliko nisu pravilno izvedeni.

Tabela XIII – Prikaz mehaničke čvrstoće aluminijuma i bakra

	ALUMINIJUM	BAKAR
Zatezna čvrstoća	70-90 MPa	200-240 MPa Hladno valjani bakar: do 480 (MPa).
Tvrdoća:	18–23 kp/mm²	41 kp/mm²

Prednost po pitanju mehaničke čvrstoće/spajanja je na strani bakra, kako se vidi iz Tabele XIII.

ZAKLJUČAK

Zaključak po pitanju „Šta je bolje?"
Bakar je tehnički superioran materijal u smislu performansi, efikasnosti i lakog spajanja. Nudi manje gabarite, veću otpornost na kratke spojeve.
Aluminijum je ekonomski bolji izbor. Omogućava proizvodnju jeftinijih, lakših transformatora, pod uslovom da je proizvodnja standardizovana kao i metoda spajanja.

Analiza pokazuje da je bolje da se ugrađuju transformatori sa bakarnim namotajima za transformatore snage veće od 400 kVA.

LITERATURA

[1] Atesti i katalozi proizvođača transformatora domaćeg proizvođača Minel Trafo Mladenovac
[2] Atesti i katalozi proizvođača transformatora inostranog proizvođača ELPROM Trafo
[3] Tehnička preporuka TP 1 –Dodatak 1, II Izdanje 2008
[4] Standard IEC 60076-1, Edition 2.1 2000-04, Power Transformers
[5] Standard IEC 60071 - Insulation coordination
[6] Distribution Transformer Handbook, Richard Alexander, 2009.
[7] Pavilnik o zahtevima eko-dizajna za energetske transformatore (Sl.glasnik RS бр.6/24)