Broj rada: R1-03
DOI:10.46793/CIRED2026.R1-03_149

OPTIMIZACIJA TERMIČKOG DIZAJNA ENERGETSKIH ULJNIH TRANSFORMATORA U SKLADU SA ZAHTEVIMA TIER 2 ZA SMANJENJE GUBITAKA

OPTIMIZATION OF THERMAL DESIGN OF LIQUID IMMERSED POWER TRANSFORMERS CONSIDERING TIER 2 LOSS REQUIREMENTS

Zoran RADAKOVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija*
Marko NOVKOVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija
Tamara PJEVAC, Student, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija
Vuk VLAHOVIĆ, Student, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija
Milan ĆELOVIĆ, Comel transformatori d.o.o., Srbija
Jelena ĆELOVIĆ, Comel transformatori d.o.o., Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Zahtevi za povećanje energetske efikasnosti doveli su do uvođenja regulatornih standarda koji zahtevaju značajno manje gubitke u energetskim transformatorima. Transformatori proizvedeni nakon jula 2021. godine (Tier 2) imaju za 15-25% niže gubitke u odnosu na transformatore proizvedene pre 2015. godine. Smanjenje gubitaka posledično dovodi do manje generisane toplote unutar transformatora, što otvara mogućnost optimizacije rashladnog sistema. Ovaj rad ispituje da li je kod transformatora srednjih snaga (do 100 MVA), kod kojih se standardno primenjuje hlađenje prirodnim strujanjem ulja i prinudnim strujanjem vazduha (ONAF), tehnički i ekonomski opravdano primeniti hlađenje bez ventilatora (ONAN). Analiza je sprovedena za transformator 80/80/25 MVA, sa hlađenjem ONAF, 110±10×1,5%/33/10 kV, sprega YNyn0(d5), projektovan u skladu sa zahtevima Tier 2. Polazeći od originalnog projekta sa 14 radijatora i 28 ventilatora, broj radijatora je postepeno povećavan sve dok temperatura najtoplije tačke, srednje temperature namotaja i gornjeg ulja pri snazi 80 MVA nisu opale ispod garantovanih vrednosti u režimu ONAN. Termički proračuni su vršeni primenom softvera baziranog na detaljnom termo-hidrauličkom mrežnom modelu (DTHNM). Rezultati simulacija verifikovani su pomoću rezultata ogleda zagrevanja pri snazi 80 MVA (ONAF) i 50 MVA (ONAN). Rezultati pokazuju da je za postizanje snage 80 MVA u režimu ONAN potrebno 24 radijatora. Ekonomska analiza uključuje kapitalizovane troškove rashladnog sistema, troškove potrošnje ventilatora tokom 30 godina eksploatacije i zahteve za prostorom u transformatorskoj stanici. Rad pruža tehno-ekonomski okvir za odlučivanje o optimalnom tipu hlađenja transformatora srednjih snaga u kontekstu zahteva Tier 2.

Ključne reči: Optimizacija rashladnog sistema, Termo-hidraulički mrežni model, Tier 2 gubici, Uljni energetski transformatori

* Zoran Radaković radakovic@etf.rs; Marko Novković novkovic@etf.rs;
Tamara Pjevac pt220045d@student.etf.bg.ac.rs; Vuk Vlahović vv200297d@student.etf.bg.ac.rs;
Milan Ćelović milan.celovic@comel.co.rs; Jelena Ćelović jelena.celovic@comel.co.rs

ABSTRACT

Requirements for increased energy efficiency have introduced regulatory standards demanding significantly lower losses in power transformers. Transformers manufactured after July 2021 (Tier 2) exhibit 15-30% lower losses compared to units produced before 2015. The reduction of losses consequently results in lower generated heat, opening possibilities for cooling system optimization. This paper investigates whether it is technically and economically justified to apply cooling without fans (ONAN) in medium power transformers (up to 100 MVA), where cooling by natural oil flow and forced air flow (ONAF) is applied as standard. The analysis was carried out for an ONAF 80/80/25 MVA transformer, 110±10×1.5%/33/10 kV, YNyn0(d5) connection, designed in accordance with Tier 2 requirements. Starting from the original design with 14 radiators and 28 fans, the radiators' number was progressively increased until hot-spot temperature, average winding temperature, and top oil temperature at 80 MVA power fell below guaranteed values in ONAN mode. Thermal calculations were performed using software based on a detailed thermo-hydraulic network model (DTHNM). Calculation results from software were validated using the results from temperature rise tests at 80 MVA (ONAF) and 50 MVA (ONAN). Results show that achieving 80 MVA in ONAN mode requires 24 radiators. Economic analysis includes capitalized costs of the cooling system, fan power consumption costs over 30 years of operation, and space requirements in transformer substations. The paper provides a techno-economic framework for deciding on optimal cooling type for medium power transformers in the context of Tier 2 requirements.

Keywords: Cooling system optimization, Thermal hydraulic network model, Tier 2 losses, Liquid-immersed power transformers

UVOD

Energetski transformatori srednjih snaga (30-100 MVA i nominalnog napona 110/33 kV) predstavljaju ključne komponente prenosnih i distributivnih mreža. U nominalnom režimu rada, ovi transformatori se standardno hlade primenom kombinovanog sistema ONAF (*Oil Natural Air Forced*) – prirodno strujanje ulja i prinudno strujanje vazduha pomoću ventilatora.

Regulatorni zahtevi za povećanje energetske efikasnosti doveli su do postepenog uvođenja ograničenja gubitaka kroz tri faze: bazni nivo (pre 2015. godine), Tier 1 (jul 2015. godine) i Tier 2 (jul 2021. godine) [1]. Standardi Tier 2 zahtevaju smanjenje gubitaka u magnetnom kolu za približno 20% i gubitaka usled opterećenja za 15-25% u odnosu na bazne vrednosti [2]. Posledično, ukupni gubici transformatora snage 80 MVA smanjuju se sa približno 350 kW na oko 300 kW.

Smanjenje gubitaka ima direktan uticaj na termičko ponašanje transformatora. Niža zapreminska gustina gubitaka u provodnicima i materijalu magnetnog kola rezultuje manjim padovima temperature pre prenosa toplote na spoljašnji rashladni sistem. Ova činjenica je otvorila pitanje da li je moguće preći na ONAN (*Oil Natural Air Natural*) hlađenje i time ostvariti povoljnije tehničke i ekonomske parametre.

Ovaj rad analizira tehnička i ekonomska pitanja prelaska sa hlađenja ONAF na ONAN za konkretni transformator 80/80/25 MVA projektovan prema standardima Tier 2. Analiza je sprovedena primenom detaljnog termo-hidrauličkog mrežnog modela (DTHNM) [3, 4], koji omogućava simulaciju raspodele protoka ulja i temperatura u svim delovima transformatora za različite konfiguracije rashladnog sistema.

1 METODOLOGIJA

1.1 Detaljni termo-hidraulički mrežni model

Termička analiza je sprovedena primenom softvera [5], baziranog na detaljnom termo-hidrauličkom mrežnom modelu (DTHNM). Za razliku od tradicionalnih pristupa baziranih na empirijskim korelacijama (IEC 60076-7, IEEE C57.91), pristup DTHNM omogućava:

- proračun raspodele temperatura u celom transformatoru (namotaji, magnetno kolo, konstrukcioni delovi, rashladni sistem, do nivoa svakog provodnika i najmanjeg kanala kroz koji struji ulje);
- proračun raspodele protoka ulja kroz sve delove transformatora (namotaji, magnetno kolo, *by-pass* ulja, rashladni sistem);
- analizu uticaja proizvoljnih promena rashladnog sistema (isključenje/uključenje ventilatora ili radijatora);
- proračun za proizvoljne uslove opterećenja i temperature ambijenta.

Ulazni podaci za proračune uključuju detaljnu konstrukciju transformatora (broj i dimenzije kanala, debljine izolacije, pozicije radijatora itd.), fizičke parametre korišćenih materijala (termička provodnost čvrste izolacije, viskoznost i termička provodnost ulja) i raspodelu gubitaka dobijenu elektromagnetnim proračunima.

Osnove modela objavljene su u [3] 2010. godine. Tokom dugogodišnje primene u praksi model je testiran na velikom broju transformatora, a mnoga poređenja sa rezultatima merenja objavljena su i u nizu radova. Iskustva i preporuke u vezi sa ovim pristupom date su i u CIGRE brošuri A2.38 Thermal modelling iz 2016. godine [4].

1.2 Opis predmetnog transformatora

Analiziran je trofazni trostubni transformator sa četiri namotaja na svakom stubu:

- visokonaponski (VN) namotaj: 110/√3 kV, cik-cak strujanje ulja;
- srednjenaponski (SN) namotaj: 33/√3 kV, cik-cak strujanje ulja;
- niskonaponski (NN) namotaj: 10 kV, samo aksijalni kanali;
- regulacioni namotaj: redno vezan sa VN, samo aksijalni kanali.

Rashladni sistem u originalnoj ONAF konfiguraciji sastoji se od 14 radijatora (dve baterije po sedam radijatora). Svaki radijator ima 28 ploča, od kojih 25 ploča visine 2600 mm i tri ploče visine 2200 mm. Ukupno 28 ventilatora (dva po radijatoru) ugrađeni su ispod radijatora sa vertikalnim potiskivanjem vazduha.

Nominalna snaga gubitaka (za poziciju regulatora sa minimalnim brojem navojaka u VN namotaju) iznosi: gubici u jezgru 31,32 kW; gubici u namotajima (NN: 0,47 kW, SN: 37,86 kW, VN: 45,18 kW); gubici u konstruktivnim delovima usled rasutog fluksa 14,4 kW; gubici u zidovima suda 3,5 kW; što daje ukupno 299,82 kW.

1.3 Plan analiza

Analiza je sprovedena u sledećim koracima:

1. verifikacija modela poređenjem simuliranih temperatura sa rezultatima fabričkog ogleda zagrevanja u režimu ONAF (80 MVA) i režimu ONAN (50 MVA);
2. analiza temperaturnog ponašanja originalnog dizajna ONAF pri snazi 80 MVA i utvrđivanje maksimalnog opterećenja, odnosno da li je moguće smanjiti broj radijatora i ventilatora, a da snaga ostane 80 MVA;
3. simulacija originalnog dizajna u režimu ONAN (svi ventilatori isključeni) pri 80 MVA i identifikacija termičkih ograničenja;
4. iterativno povećanje broja radijatora u režimu ONAN dok sve temperature pri 80 MVA ne zadovolje garantovane vrednosti;
5. komparativna tehno-ekonomska analiza rešenja ONAF i ONAN.

Garantovane vrednosti porasta temperatura u odnosu na ambijent iznose: gornje ulje 60 K; srednja temperatura namotaja 70 K; najtoplija tačka (*hot-spot*) 78 K.

2 REZULTATI I DISKUSIJA

2.1 Verifikacija detaljnog termo-hidrauličkog modela

Pre primene modela za optimizacione analize, sprovedena je detaljna verifikacija poređenjem simuliranih temperatura i temperatura izmerenih u fabričkom ogledu zagrevanja. U transformator je ugrađeno 12 fiber-optičkih (FO) senzora kojima se mere temperature pri vrhu VN i SN namotaja. Ogled je sproveden u dve konfiguracije: ONAF pri snazi 80 MVA i ONAN pri snazi 50 MVA.

Tabela I prikazuje poređenje za režim ONAF pri 80 MVA. Uslovi ogleda: temperatura ambijenta 26,3°C; svi radijatori i ventilatori aktivni. Tabela II prikazuje poređenje za režim ONAN pri 50 MVA. Uslovi ogleda: temperatura ambijenta 23,8°C; svi ventilatori isključeni.

Najveća temperatura izolacije se pojavljuje na mestima koja se razlikuju od mesta postavljanja FO senzora.

Na Slici 1 prikazana je raspodela temperature na vrhu namotaja, na kojoj se uočava i pozicija najtoplije tačke (namotaji NN, SN i VN, gledano sleva nadesno), kao i raspodela gubitaka u provodnicima i brzina u radijalnim kanalima za hlađenje u SN i VN namotajima.

U Tabeli III prikazani su porasti temperatura u najtoplijoj tački, dobijeni proračunom, i vrednosti dobijene pomoću FO senzora. U svaku fazu VN i SN namotaja su na istim visinskim pozicijama, na dve ugaone nasuprotne pozicije u ravni magnetnog kola, postavljeni FO senzori. Vrednosti dobijene FO senzorima dobijene su usrednjavanjem po šest vrednosti (dve pozicije u tri faze), za svaki od VN i SN namotaja.

Tabela I – Poređenje proračunskih i izmerenih porasta temperatura u režimu ONAF pri 80 MVA.

Veličina	**Srednja VN**	**Srednja SN**	**FO VN**	**FO SN**	**Gornje ulje**	**Donje ulje**
Izračunato [K]	45,3	48,5	58,5	65,1	35,6	12,2
Izmereno [K]	44,2	50,9	57,7	59,8	35,8	9,6
Razlika [K]	-1,1	2,4	-0,8	-5,3	0,2	-2,6
Garantovana [K]	**70**	**70**	**-**	**-**	**60**	**-**

Tabela II – Poređenje proračunskih i izmerenih porasta temperatura u režimu ONAN pri 50 MVA.

Veličina	**Srednja VN**	**Srednja SN**	**FO VN**	**FO SN**	**Gornje ulje**	**Donje ulje**
Izračunato [K]	30,8	32,7	39,0	42,1	31,7	14,5
Izmereno [K]	33,8	37,6	43,0	43,7	30,5	14,4
Razlika [K]	3,0	4,9	4	1,6	-1,2	-0,1

Tabela III – Poređenje proračunskih porasta temperatura u najtoplijoj tački i vrednosti dobijenih FO senzorima.

Lokacija	VN ONAF 80 MVA [K]	SN ONAF 80 MVA [K]	VN ONAN 50 MVA [K]	SN ONAN 50 MVA [K]
Pozicija FO	58,5	65,1	39,0	42,1
Hot-spot	59,6	72,9	39,4	45,2
Razlika [K]	1,1	7,8	0,4	3,1

2.2 Analiza hlađenja ONAF– originalni dizajn

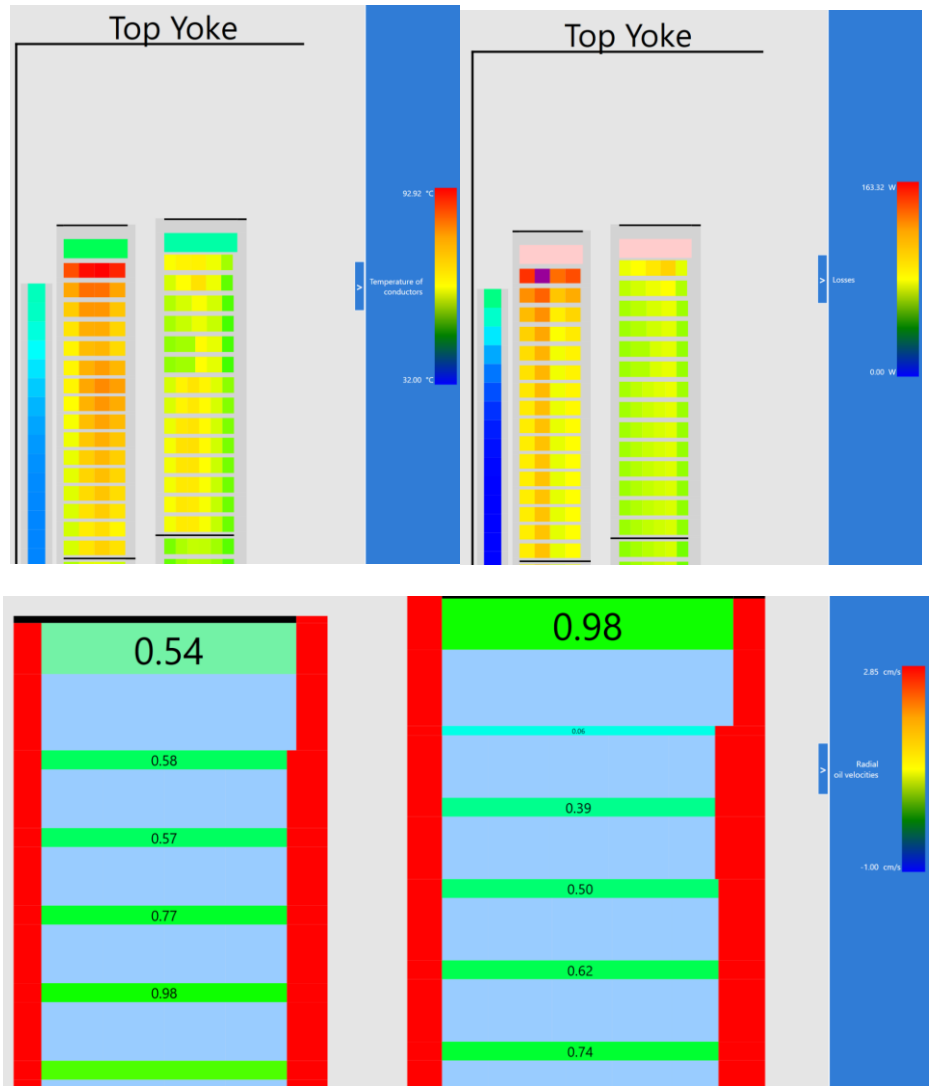
Originalni dizajn transformatora sa 14 radijatora i 28 ventilatora analiziran je za različita opterećenja kako bi se utvrdio termički kapacitet. Simulacije su pokazale da pri nominalnoj snazi 80 MVA sve temperature zadovoljavaju garantovane vrednosti sa značajnim rezervama: najtoplija tačka SN namotaja 72,9 K (garantovano 78 K); najtoplija tačka VN namotaja 59,6 K (garantovano 78 K); srednja temperatura SN 48,5 K (garantovano 70 K); srednja temperatura VN 45,3 K (garantovano 70 K); gornje ulje 35,6 K (garantovano 60 K).

Iterativnim povećanjem snage opterećenja utvrđeno je da temperatura najtoplije tačke SN namotaja (koja je kritična) dostiže garantovanu vrednost 78 K pri opterećenju 83,2 MVA. To znači da transformator ima termički kapacitet koji omogućava za 4% veće opterećenje od nominalne snage. Iz toga sledi da je moguće optimizovati rashladni sistem.

2.3 Optimizacija rešenja ONAF– smanjenje broja radijatora i ventilatora

Broj radijatora i ventilatora je postepeno smanjivan u simulacijama sve dok sve garantovane temperature pri 80 MVA nisu zadovoljene. Utvrđeno je da je potrebno šest radijatora po bateriji (ukupno 12 radijatora) i 24 ventilatora. U ovoj konfiguraciji, pri 80 MVA, vrednost porasta temperature najbliža garantovanoj vrednosti je temperatura najtoplije tačke SN namotaja, 76,6 K (garantovana vrednosti 78 K).

Smanjenje broja radijatora sa 14 na 12, odnosno ventilatora sa 28 na 24, predstavlja smanjenje od 14,3%. Sve temperature ostaju ispod garantovanih vrednosti sa dovoljnim rezervama za sigurnu eksploataciju. Kritična je i dalje temperatura najtoplije tačke SN namotaja sa najmanjom rezervom od 1,4 K.



Slika 1 – Raspodela temperature (slika gore levo), raspodela gubitaka (slika gore desno) i raspodela brzine strujanja ulja (donja slika) u namotajima.

2.4 Analiza hlađenja ONAN sa originalnim brojem radijatora

Simulacija originalnog dizajna u režimu ONAN (14 radijatora, svi ventilatori isključeni) pri snazi 80 MVA pokazuje značajno povećanje temperatura:

- najtoplija tačka SN namotaja: 94,6 K (prekoračenje garantovane vrednosti za 16,6 K);
- najtoplija tačka VN namotaja: 73,8 K (ispod garantovane vrednosti);
- gornje ulje: 52,1 K (ispod garantovane vrednosti).

Iterativno smanjivanje snage pokazuje da sa 14 radijatora u režimu ONAN transformator može da se optereti maksimalno do 71,2 MVA (89% od nominalne snage 80 MVA). Za postizanje pune snage 80 MVA u ONAN režimu neophodno je povećati broj radijatora.

2.5 Optimizacija rešenja ONAN– povećanje broja radijatora

Broj radijatora je postepeno povećavan u simulacijama sve dok sve garantovane temperature pri 80 MVA nisu zadovoljene. Utvrđeno je da je potrebno 12 radijatora po bateriji (ukupno 24 radijatora). U ovoj konfiguraciji, pri 80 MVA, vrednost porasta temperature najbliža

garantovanoj vrednosti je temperatura najtoplije tačke SN namotaja, 77,9 K (garantovana vrednost 78 K).

Povećanje broja radijatora sa 14 na 24 predstavlja porast od 71,4%. Sve temperature ostaju ispod garantovanih vrednosti sa dovoljnim rezervama za sigurnu eksploataciju. Kritična je i dalje temperatura najtoplije tačke SN namotaja sa najmanjom rezervom od svega 0,1 K.

3 TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

3.1 Tehnički parametri poređenja

Za objektivno poređenje, obe analizirane konfiguracije projektovane su za istu nominalnu snagu od 80 MVA. Konfiguracija ONAF ima 12 radijatora sa 24 ventilatora, dok konfiguracija ONAN ima 24 radijatora bez ventilatora. Obe konfiguracije obezbeđuju snagu 80 MVA pri garantovanim temperaturnim granicama. Tabela IV sumira ključne tehničke parametre.

Konfiguracija ONAN zahteva duplo više radijatora (100% porast) ali eliminiše svih 24 ventilatora i njihovu potrošnju od 6,48 kW (2,2% od ukupnih gubitaka transformatora pri nominalnom opterećenju).

3.2 Ekonomska analiza

Ekonomska analiza obuhvata sledeće komponente:

- inicijalni troškovi rashladnog sistema (radijatori i ventilatori);
- kapitalizovani troškovi potrošnje ventilatora tokom životnog veka;
- troškovi održavanja ventilatora;
- troškovi prostora u transformatorskoj stanici.

Tabela IV – Poređenje tehničkih parametara ONAF i ONAN konfiguracija za 80 MVA.

Parametar	ONAF	ONAN	Razlika
Broj radijatora	12	24	+100%
Broj ventilatora	24	0	-100%
Ukupna širina radijatora [m]	7,2	14,4	+7,2 m
Potrošnja ventilatora [kW]	6,48	0	-6,48 kW
Nominalno opterećenje [MVA]	80,0	80,0	0%

3.2.1 Inicijalni troškovi

Bazne cene komponenti (prema podacima proizvođača iz 2026. godine):

- radijator (visina 2600 mm, 28 ploča): 1.900 EUR;
- ventilator (270 W): 318 EUR;
- ulje 1,8 EUR/l.

Inicijalni troškovi rashladnog sistema:

- ONAF: 12 × 1.900 EUR + 24 × 318 EUR = 30.432 EUR;
- ONAN: 24 × 1.900 EUR + 2280 l × 1,8 EUR/l = 49.704 EUR;
- razlika: +19.272 EUR u korist ONAF (+63,3%).

Povećanje broja radijatora sa 12 na 24 predstavlja dodatnih približno 9 t mase (oko 2 t ulja i oko 7 t čelika). Ekonomska analiza koja se odnosi na samu konstrukciju transformatora će se zadržati na ceni ulja i konstruktivnog čelika. Nisu razmatrani detalji montaže (opcije su direktno na sud, kao što je slučaj kod razmatranog transformatora ili kao baterija radijatora povezana na cev za toplo ulje i cev za hladno ulje). Dakle, potencijalni troškovi ojačanja konstrukcije suda, cevi za bateriju radijatora i nosača ventilatora nisu uključeni u analizu.

3.2.2 Kapitalizovani troškovi potrošnje

Proračun kapitalizovanih troškova potrošnje električne energije ventilatora zasniva se na sledećim pretpostavkama:

- životni vek transformatora (n): 30 godina;
- prosečan faktor opterećenja: 10-60% (procenat vremena kada su ventilatori aktivni)*;
- cena električne energije: 0,1035 EUR/kWh (prosečna cena u 2024. godini);
- diskontna stopa (r): 6% godišnje.

*Tačna vrednost procenta vremena kada su ventilatori uključeni zavisi od dijagrama opterećenja transformatora i temperature ambijenta na lokaciji. Detaljniju analizu je moguće izvršiti na osnovu ovih podataka, kao i šeme po kojoj se grupe ventilatora uključuju (uobičajeno je da radi jedna grupa ventilatora – ONAF1, dve grupe ventilatora – ONAF 2 ili nijedna - ONAN). Umesto toga, u radu je faktor opterećenosti transformatora uvažen tako što je variran u opsegu 10-60 %. Primer proračuna kapitalizovanih troškova dat je za vrednost 60%, a rezultati za ceo opseg 10-60%prikazani su u tabeli V.

Godišnja potrošnja ventilatora:

$$E = 6{,}48\,kW \cdot 8760\,h/god \cdot 0{,}60 = 34.059\,kWh/god\ . \tag{1}$$

Godišnji troškovi energije:

$$C_{god} = E \cdot 0{,}1035\,EUR/kWh = 3.525\,EUR/god\ . \tag{2}$$

Kapitalizovana vrednost troškova za 30 godina (neto sadašnja vrednost):

$$NSV = C_{god}\,\frac{1-(1+r)^{-n}}{r} = 3.525\,EUR/god \cdot 13{,}765 = 48.522\,EUR\ . \tag{3}$$

Faktor anuiteta za 30 godina pri diskontnoj stopi od 6% iznosi 13,765. Ovaj faktor transformiše niz jednakih godišnjih plaćanja u njihovu neto sadašnju vrednost.

Tabela V – Energetski trošak (za 30 godina) u funkciji faktora opterećenja.

Faktor opterećenja	**10%**	**20%**	**30%**	**40%**	**50%**	**60%**
E [kWh/god]	5.676	11.353	17.029	22.706	28.382	34.059
C_{god} [EUR/god]	588	1.175	1.763	2.350	2.938	3.525
NSV [EUR]	8.087	16.174	24.261	32.348	40.435	48.522

3.2.3 Troškovi održavanja

Troškovi preventivnog i korektivnog održavanja ventilatora:

- godišnja inspekcija i podmazivanje: 50 EUR/ventilator**;
- zamena jednog ventilatora na svakih 12 godina: 318 EUR**;
- godišnji troškovi održavanja: 24 × 50 + 24/12 × 318 = 1.836 EUR/god (radni vek ventilatora 12 godina, što uz ukupno 24 ventilatora, uz pretpostavku ravnomerno raspoređene (stepenaste) zamene, daje prosečno 24/12 = 2 zamenjena ventilatora godišnje);
- kapitalizovana vrednost: 1.836 × 13,765 = 25.272 EUR.

**Procenjena vrednost tipična za industrijske ventilatore ovog razreda snage u spoljašnjoj primeni.

3.2.4 Troškovi prostora

Konfiguracija ONAN zahteva dodatnih 7,2 m ukupne širine radijatora (14,4 m umesto 7,2 m).

Povećanje potrebne površine je orijentaciono 7,2 m × 2 m = 14,4 m². U spoljašnjim postrojenjima (otvorenim TS) prostorni zahtevi su obično manje kritični, ali mogu uticati na dimenzije temelja, uljne jame, ograde i uzemljenja. Ovi detalji nisu kvantifikovani, već je u analizi uzeta prosečna vrednost dodatnih troškova od 2.880 EUR za otvorene stanice (proračunato kao 200 EUR/m² dodatnog prostora potrebnog za dodatne radijatore).

U okviru rada nisu razmatrane zatvorene TS. Poređenje ONAF i ONAN rešenja za slučaj unutrašnje ugradnje transformatora zahteva posebnu analizu (veća cena dodatnog prostora, ali i drugačiji radni uslovi transformatora – ventilatori su uključenu duži vremenski period zbog veće temperature unutar prostorije koja se zagreva usled gubitaka u transformatoru). Ovo predstavlja temu za potencijalne buduće analize i publikacije.

3.2.5 Ukupna ekonomska analiza

Tabela VI sumira ukupne troškove tokom životnog ciklusa za obe konfiguracije, pri reprezentativnom faktoru opterećenja ventilatora od 40% (sredina razmatranog opsega neizvesnosti od 10% do 60%, videti diskusiju u 3.2.2).

Tabela VI – Poređenje ukupnih troškova životnog ciklusa (30 godina) pri faktoru opterećenja od 40% .

Komponenta troška	**ONAF [EUR]**	**ONAN [EUR]**
Inicijalni (rashladni sistem)	30.432	45.600
Dodatno ulje	0	4.104
Potrošnja ventilatora (NPV)	32.348	0
Održavanje ventilatora (NPV)	25.272	0
Prostor	0	2.880
UKUPNO	**88.052**	**52.548**

Razlika u odnosu na ONAF	-	-35.468 (-40,3%)

Analiza pokazuje da je rešenje ONAN ekonomski isplativije od konfiguracije ONAF– ušteda za otvorene TS je 40% u odnosu na ukupne troškove rešenja ONAF tokom životnog veka (35.468 EUR uštede), pri usvojenom reprezentativnom faktoru opterećenja od 40%.

Ključni faktor ekonomske superiornosti rešenja ONAN su operativni troškovi ventilatora. Kapitalizovana vrednost potrošnje električne energije (32.348 EUR) i održavanja (25.272 EUR) ukupno iznosi 57.620 EUR, što je 3 puta veće od razlike u inicijalnim troškovima rashladnog sistema (19.272 EUR, uključujući dodatno ulje).

Prost period povraćaja (nediskontovani) investicije (*payback* period) za dodatne inicijalne troškove rešenja ONAN može se približno izračunati deljenjem razlike inicijalnih troškova (19.272 EUR) godišnjom uštedom u operativnim troškovima (2.350 + 1.836 = 4.186 EUR/god), što daje period povraćaja od 4,6 godina. Diskontovani period povraćaja (uz diskontnu stopu od 6%) dobija se rešavanjem jednačine

$$19.272 = 4.186 \cdot \frac{1 - 1{,}06^{-t}}{0{,}06}, \tag{4}$$

što daje rešenje $t \approx 5{,}55$. Diskontovani period povraćaja je, kao što je i očekivano, nešto duži od prostog (5,55 naspram 4,6 godina), jer uvažava smanjenu sadašnju vrednost budućih ušteda. Bez obzira na metod, period povraćaja ostaje kratak u odnosu na životni vek transformatora od 30 godina.

Ekonomska analiza zavisi od pretpostavljenog faktora opterećenja ventilatora, odnosno cena rešenja ONAF raste sa vremenom tokom koga su ventilatori aktivni. Tačna vrednost ovog faktora zavisi od stvarnog dijagrama opterećenja transformatora, temperature ambijenta na lokaciji i usvojene šeme uključivanja grupa ventilatora. Uvažavanje ovih faktora je moguće, ali prevazilazi obim inicijalnog rada o poređenju cene ONAN i ONAF opcija. Ilustracija uticaja ovih faktora je sagledana tako što je procenat vremena kada su ventilatori aktivni variran u opsegu 10-60%, a Tabela VII prikazuje ukupnu uštedu kao funkciju ovog parametra.

Tabela VII – Ukupna ušteda pri rešenju ONAN u zavisnosti od faktora opterećenja ventilatora.

Faktor opterećenja	**10%**	**20%**	**30%**	**40%**	**50%**	**60%**
ONAF [EUR]	63.791	71.878	79.965	88.052	96.140	104.227
ONAN [EUR]	52.584	52.584	52.584	52.584	52.584	52.584
Ušteda [EUR]	**11.207**	**19.294**	**27.381**	**35.468**	**43.556**	**51.643**
Ušteda [%]	17,6%	26,8%	34,2%	40,3%	45,3%	49,5%
Prost payback [god]	8,0	6,4	5,4	4,6	4,0	3,6
Diskontovani payback [god]	11,1	8,3	6,7	5,6	4,8	4,2

Za ceo razmatrani opseg (10-60%) rešenje ONAN ostaje ekonomski povoljnije od ONAF. Ušteda se kreće od 11.207 EUR (18%) do 51.643 EUR (50%), a period povraćaja od 3,6 do 11,1 godina (diskontovano), u svim slučajevima znatno kraći od životnog veka transformatora.

Pored faktora opterećenja, ekonomski rezultat zavisi i od cene električne energije, diskontne stope i cene radijatora. Tabela VIII prikazuje osetljivost uštede na ove parametre, pri faktoru opterećenja fiksiranom na reprezentativnih 40%.

Analiza osetljivosti sprovedena je tako da se u svakom scenariju menja samo jedan ulazni parametar u navedenom opsegu (±30%), dok svi ostali parametri zadržavaju svoje bazne (referentne) vrednosti.

Tabela VIII – Analiza osetljivosti - ušteda rešenja ONAN u otvorenim TS [EUR].

Parametar	Bazni scenario	Varijacija -30%	Varijacija +30%
Cena električne energije (0,1035 EUR/kWh)	35.468	25.764	45.173
Diskontna stopa (6%)	35.468	48.508	25.877
Cena radijatora (1.900 EUR)	35.468	42.308	28.628

Analiza osetljivosti pokazuje da rešenje ONAN ostaje ekonomski povoljnije u svim razmatranim scenarijima. Ušteda se kreće od 25.764 EUR do 48.508 EUR u zavisnosti od pojedinačne varijacije parametara. Povećanje diskontne stope smanjuje sadašnju vrednost budućih operativnih troškova, ali ONAN i dalje pruža uštedu od 25.877 EUR čak i pri diskontnoj stopi od 7,8%.

4 ZAKLJUČAK

Ovaj rad je prikazao komparativnu tehno-ekonomsku analizu hlađenjâ ONAF i ONAN za transformator 80/80/25 MVA, 110/33/10 kV projektovan prema zahtevima Tier 2. Analiza je sprovedena primenom detaljnog termo-hidrauličkog mrežnog modela verifikovanog rezultatima fabričkih ogleda zagrevanja.

Tehnički rezultati pokazuju da ONAN zahteva duplo više rashladne površine (24 radijatora umesto 12 sa 24 ventilatora) ali eliminiše potrošnju ventilatora od 6,48 kW. Termičko ponašanje obe konfiguracije je praktično identično pri 80 MVA – kritične temperature najtoplije tačke iznose 76,6 K (ONAF) i 77,9 K (ONAN), obe blizu garantovanih 78 K.

Ekonomska analiza životnog ciklusa (30 godina) pokazuje da ONAN rešenje ostaje jeftinije od ONAF u celom razmatranom opsegu pretpostavljenog faktora opterećenja ventilatora (10-60% godišnjeg vremena). Ukupna ušteda ONAN rešenja za otvorene transformatorske stanice kreće se od 18% (11.207 EUR) do 50% (51.643 EUR), sa periodom povraćaja dodatne investicije između 3,6 i 11,1 godine (diskontovano). Rezultat je robustan u celom razmatranom opsegu, odnosno ne postoji realističan scenario u kome ONAF postaje ekonomski povoljniji.

Pored ekonomskih prednosti, ONAN nudi značajne nenovčane prednosti – eliminaciju ventilatora kao komponenti koje mogu otkazati i značajno smanjenje buke. Glavni nedostatak je povećan prostorni zahtev (+7,2 m širine).

Planira se sprovođenje analize na još nekoliko transformatora veće i manje snage, pri čemu će prioritet imati tipski transformatori koji se najčešće koriste u elektrodistributivnom sistemu Srbije (31.5 MVA, 40 MVA, 63 MVA), kako bi se došlo do preporuka za širu klasu transformatora srednje snage. Rezultati prikazani u radu predstavljaju indikaciju primene ONAN umesto ONAF konstrukcije i na osnovu njih kupci i korisnici transformatora mogu da procene potencijal za primenu ONAN konstrukcije, odnosno promenu standardnog pristupa primene ONAF konstrukcije.

LITERATURA

[1] European Commission, „Commission Regulation (EU) No 548/2014 of 21 May 2014 on implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to small, medium and large power transformers,“ *Official Journal of the European Union*, L 152, pp. 1–15, May 2014. (dostupno online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.152.01.0001.01.ENG, provereno: 15.7.2026.)
[2] IEC 60076-20:2021, Power transformers - Part 20: Energy efficiency.
[3] Z. Radakovic, M. Sorgic, 2010, “Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers”, IEEE Trans. Power Del., 25(2), pp. 790-802, doi: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2033076.
[4] CIGRE Technical Brochure 659, *Transformer thermal modeling*, Working Group WG A2.38, June 2016, ISBN: 978-2-85873-362-0.
[5] https://www.hostcalculus.com (provereno: 25.4.2026.)
[6] J. Ćelović, M. Ćelović, A. Bušev, A. Pastor, L. Cvetković: „Prednosti primene prirodnog hlađenja energetskih transformatora većih naznačenih snaga“, CIGRE Srbija, 2025, rad A2.02, doi: https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A2.02