

## MOGUĆNOSTI UŠTEDE ENERGIJE KONTRLOM RASHLADNOG SISTEMA ENERGETSKIH ULJNIH TRANSFORMATORA

Z. RADAKOVIĆ\*, ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET, UNIVERZITET U BEOGRADU, SRBIJA  
U. RADOMAN, ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET, UNIVERZITET U BEOGRADU, SRBIJA  
N. ĐORĐEVIĆ, ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET, UNIVERZITET U BEOGRADU, SRBIJA

**Kratak sadržaj** — Razvojem mikroprocesorske tehnike i energetske elektronike su se otvorile brojne mogućnosti kompleksnog upravljanja elektroenergetskom opremom. Jedno od mogućih poboljšanja, odnosno povećanja energetske efikasnosti, je upravljanje radom ventilatora i pumpi. S obzirom da su za Cired od interesa transformatori relativno manjih snaga, kod kojih se ne koristi prinudno strujanje ulja, od praktičnog interesa je prevashodno upravljanje ventilatorima. Promenom stanja rashladnog sistema (uključivanjem / isključivanjem ventilatora, kao jednostavnog načina regulacije, odnosno podešavanjem njihove brzine obrtanja pomoću frekventnih pretvarača, kao višeg nivoa upravljanja) utiče se na karakteristike rashladnog sistema, odnosno za zadato opterećenje transformatora i temperaturu ambijenta (rashladnog fluida) menja se temperatura unutar transformatora. Gubici, pre svega oni u namotajima, su temperaturno zavisni, odnosno po pravilu rastu sa porastom temperature. Taj efekat je suprotan efektu uštede koji se postiže smanjenjem broja obrtaja ventilatora. Cilj ovog rada je da se kvantitativno ispitaju i uporede uštede energije smanjenjem broja obrtaja ventilatora i povećanje gubitaka koje nastaje kao rezultat posledičnog povećanja temperatura namotaja i gubitaka u njima.

**Ključne reči** – Energetska efikasnost, Monitoring, Optimizacija hlađenja, Detaljni termo-hidraulički model uljnih transformatora

### 1 UVOD

Skoro svi distributivni energetski transformatori rade u uslovima promenljivog opterećenja (promenljive struje) i temperature ambijenta. Posledično, gubici i temperature unutar transformatora se menjaju u toku vremena. Zbog velikih masa i termičkih kapaciteta, tokom ograničenog vremena kroz transformator može proticati struja veća od nominalne, što predviđaju i standardi za opterećivanje transformatora (1), (2). Vrednosti temperature ulja i čvrste izolacije, kao i temperatura konstruktivnih delova, pri tome moraju da budu ispod graničnih vrednosti pri kojima bi došlo do trenutnog oštećenja ili neprihvatljivo velikog kumulativnog pogoršanja svojstava izolacije (starenja izolacije).

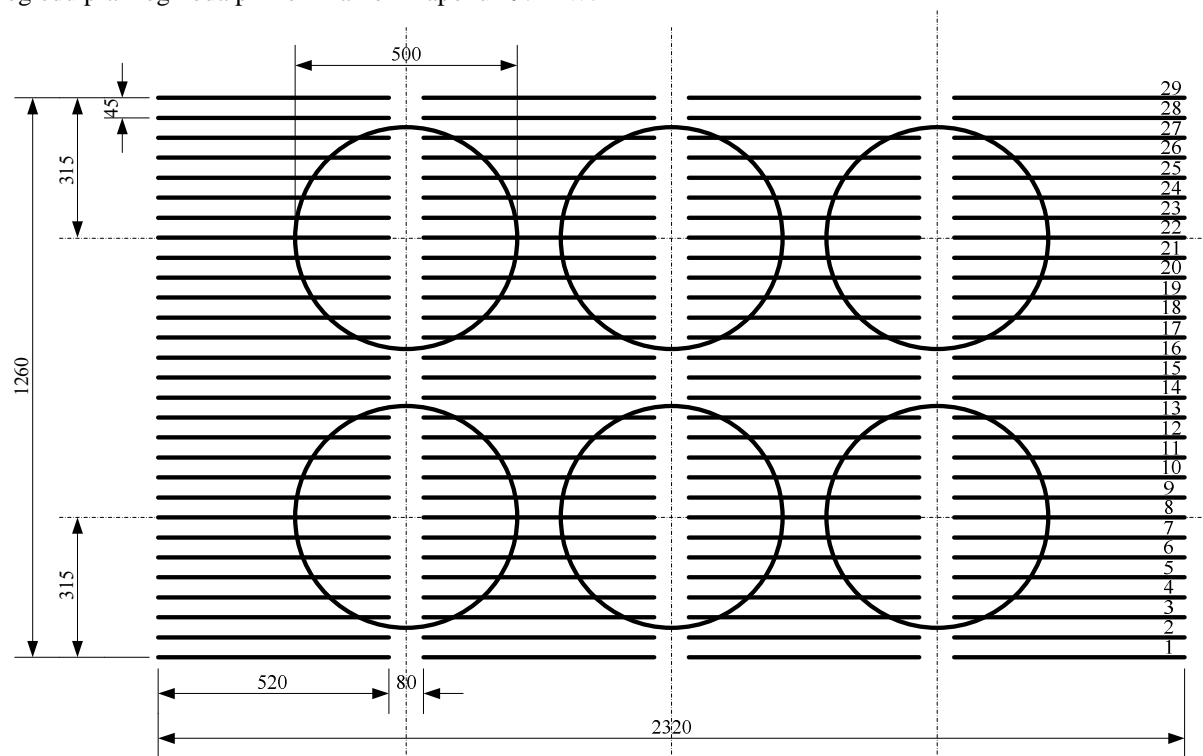
Pored toga, od praktičnog je interesa vršiti kontrolu rashladnog sistema. Uobičajeno je da se grupe ventilatora (na primer dve) uključuju i isključuju zavisno od vrednosti temperature gornjeg ulja, primenjujući jednostavni histerezisni regulator. Ova jednostavna logika, da se pri malim opterećenjima i niskim temperaturama ambijenta isključuje deo ili svi ventilatori, se može unaprediti uvođenjem kontrole učestanosti napona napajanja motora ventilatora. Na taj način se može vršiti kontrola temperature gornjeg ulja, što je od interesa da bi se smanjilo

---

\* Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, radakovic@etf.rs

"disanje transformatora" (širenje i skupljanje ulja - prilikom skupljanja ulja, u transformator, preko silika gela, ulazi ambijentalni vazduh). Uloga silika gela je da apsorbira vlagu prisutnu u vazduhu, ali se smanjenjem disanja transformatora povećava period zamene / regenerisanja silika gela. Sledeća prednost uvođenja kontrole temperature gornjeg ulja je da se transformator može održavati u stanju koje omogućava preopterećenje transformatora definisanom snagom u definisanom vremenskom periodu (na primer 25% u trajanju od 2 časa). Ovaj poslednji kriterijum bi se mogao postići i uključivanjem čitave grupe ventilatora na pun napon, ali bi se tu opet pojavila nepoželjna promena temperature gornjeg ulja. Pored toga, rad ventilatora sa manjom brzinom, u režimu regulacije brzine obrtanja, može dovesti do uštede energije na rad rashladnog sistema.

U (1) je opisan realizovani sistem za kontrolu brzine obrtanja ventilatora kojima se hladi mali ogledni uljni transformator snage 6.6 kVA, gde su prikazani i eksperimentalni rezultati, pri različitim nivoima strujnog opterećenja transformatora. U prethodnoj publikaciji (1) je opisan hardver i data osnova kontrolera koji održava temperaturu gornjeg ulja na zadatoj vrednosti. Kao nastavak razmatranja svake od relevantnih komponenti kompletnog sistema za optimizaciju rada rashladnog sistema, ovaj rad razmatra aspekt utroška energije, odnosno energetskih gubitaka. Kao slučaj za analizu je uzet realni trofazni tronamotajni transformator YNyn0 + d1, 132 / 13.8 / 11 kV (opseg regulacije napona promenom pozicije regulatora napona pod opterećenjem od  $-12 \times 1.43\%$  do  $+7 \times 1.43\% = -17.16\%$  do  $+10\%$ ), nominalne snage u ONAF režimu rada 40 / 40 / 13.33 MVA, sa dva bloka radijatora montirana na sud, svaki sa 4 radijatora, svaki od radijatora sa 29 ploča visine 1.9 m. Položaj ventilatora, ispod jednog od dva identična bloka radijatora, prikazan je na slici 1. Detalji o konstrukciji namotajima se mogu naći u (2). Ukupni gubici pri položaju regulatora napona 8 i pri nominalnoj struji transformatora u kratkom spoju, preračunati na 75 °C, iznose 194.28 kW, a gubici u magnetnom kolu, određeni u ogledu praznog hoda pri nominalnom naponu 19.2 kW.



Slika 1 - Položaj ventilatora, ispod jednog od dva identična bloka radijatora

## 2 O SOFTVERU ZA TERMIČKE PRORAČUNE

Za analize koje su sadržane u radu je korišćen softver baziran na detaljnom termo-hidrauličkom modelu. Model je prikazan u prethodnim publikacijama - osnovne postavke u (3), najdetaljniji prikaz u (4), poslednja od nekoliko publikacija koje prikazuju primenu modela (5). Rezultat proračuna su vrednosti u svim karakterističnim tačkama namotaja i ulja, kao i lokalne vrednosti temperatura svakog od navojaka i ulja u svakom od kanala za hlađenje. Pored temperatura ulja, program izračunava i ukupne protoke kroz svaki od delova transformatora (namotaje i jezgro, kao i kroz hladnjake), kao i raspodelu protoka kroz kanale za hlađenje u namotajima i jezgru). Kao ulazni podaci se koriste detaljni konstruktivni podaci i karakteristike primenjenih materijala. Program je potpuno baziran na fizičkom modelu, tako da se za delove transformatora, kao i unutar svakog od delova, primenjuju zakoni održanja toplote, materije i pritiska po svakoj od zatvorenih putanja strujanja ulja.

### 3 SKUP PRORAČUNA

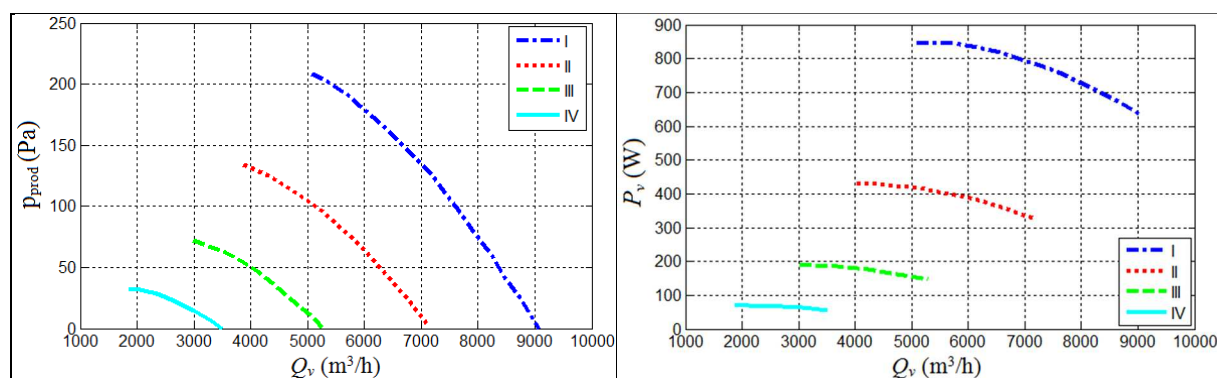
Aspekt energetske efikasnosti, odnosno poređenje uštede energije potrebne za rad ventilatora kada im se smanji broj obrtaja sa posledičnim povećanjem temperature namotaja i gubitaka u njima usled porasta specifične električne otpornosti, je analiziran na sledeći način.

Proračuni su izvršeni za nekoliko ventilatora, prečnika jednakog prečniku ventilatora koji su zaista instalirani na transformatoru. Korišćeni su ventilatori proizvođača koji kao kataloške podatke daje zavisnosti proizvedenog pritiska u funkciji protoka, i to za više brzina obrtanja, koje nastaju kao rezultat promenljive učestanosti napona napajanja ventilatora. U tabeli 1 su prikazani podaci o korišćenim ventilatorima. Na slici 2 su, primera radi, za baznu učestanost napajanja 50 Hz prikazane krive zavisnosti produkovanog pritiska ( $p_{prod}$ ) i utrošene snage ( $P$ ) od protoka vazduha ( $Q_v$ ).

TABELA 1 - KARAKTERISTIKE VENTILATORA PRI RAZLIČITIM UČESTANOSTIMA NAPONA NAPAJANJA (40, 60, 80 I 100 %) BAZNE UČESTANOSTI 50 HZ I 60 HZ

Bazna učestanost	Brzina* ( $\text{min}^{-1}$ )	Snaga* (W)	Brzina* ( $\text{min}^{-1}$ )	Snaga* (W)	Brzina* ( $\text{min}^{-1}$ )	Snaga* (W)	Brzina* ( $\text{min}^{-1}$ )	Snaga* (W)
50 Hz	1440	1050	1150	580	860	250	580	85
60 Hz	1550	1400	1240	700	930	300	620	100

\* Nominalni kataloški podaci; vrednost snage za uspostavljenu radnu tačku se očitava sa krivih u katalogu



Slika 2 - Primer kataloških krivih za jedan od primenjenih ventilatora (I-1440  $\text{min}^{-1}$ , II-1150  $\text{min}^{-1}$ , III-860  $\text{min}^{-1}$ , IV-580  $\text{min}^{-1}$ )

Za svaku od 8 karakteristika ventilatora, korišćenjem softvera pomenutog u odeljku 2., izvršen je niz proračuna za transformator u kratkom spoju (kao pri ogledu zagrevanja), u stacionarnim toplotnim stanjima pri različitim opterećenjima (struja se varira u opsegu 60 % - 120 % nominalne, gubici u gvožđu su bili jednaki nuli, temperatura ambijenta 20 °C, a regulator napona je u poziciji „I“, pri kojoj su svi provodnici regulacionih delova (fina i gruba regulacija) visokonaponskog namotaja uključeni (linijski napon sa VN strane 145213 V).

### 4 REZULTATI PRORAČUNA

U tabeli 2 su prikazani protoci vazduha, za svaku od 8 karakteristika ventilatora; protoci vazduha se u softveru dobijaju iz ravnotežnog stanja pritiska koji proizvode ventilatori i pada pritiska usled trenja strujanju vazduha između ploča radiatora.

TABELA 2 - PROTOCI VAZDUHA I POTROŠNJA VENTILATORA

Nominalna brzina ventilatora ( $\text{min}^{-1}$ )	1550	1440	1240	1150	930	860	620	580
$Q_v$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	8917	8229	7058	6502	5196	4793	3387	3189
$P_v$ (W)	839.5	710.4	432.2	365.1	190.7	161.5	67.4	61

$Q_v$  - protok vazduha,  $P_v$  - potrošnja ventilatora

Gubici u namotajima zavise od struje i temperature. Ukupni gubici u namotajima su izračunavani kao zbir gubitaka u svakom od navojaka - gubici u svakom od navojaka su jednaki zbiru Džulovih gubitaka i dodatnih gubitaka, nastalih kao rezultat potiskivanja struje u provodniku koji se nalazi u magnetnom polju rasutog fluksa.

Način proračuna magnetskog polja (radijalne i aksijalne komponente vektora magnetske indukcije u središtu svakog od provodnika  $B_x$  i  $B_y$ ), korišćenjem softvera baziranog na metodi konačnih elemenata (FEM), opisan je u (2). Vrednost komponenti gubitaka po jedinici zapremine provodnika koje potiču od  $B_x$  i  $B_y$  je izračunata pomoću analitičkih izraza izvedenih u teoriji elektromagnetike (6):

$$p_{ex} = \frac{B_x^2}{\mu_0^2 \sigma \delta} \frac{\sinh(dimY \cdot k) - \sin(dimY \cdot k)}{\cosh(dimY \cdot k) + \cos(dimY \cdot k)}$$

$$p_{ey} = \frac{B_y^2}{\mu_0^2 \sigma \delta} \frac{\sinh(dimX \cdot k) - \sin(dimX \cdot k)}{\cosh(dimX \cdot k) + \cos(dimX \cdot k)}$$

gde su  $\mu_0$  magnetska permeabilnost vakuuma (za bakar je  $\mu_r = 1$ ),  $\sigma$  provodnost bakra za zadatu temperaturu,  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$  dubina prodiranja,  $k = 1/\delta$ ,  $\omega$  kružna učestanost ( $\omega = 2 \pi f = 2 \pi 50 = 100 \pi$ ), a  $dimX$  i  $dimY$  su radijalna (širina) i aksijalna (visina) dimenzija provodnika. Gubici u svakom od navojaka ( $P_d$ ) se dobijaju množenjem zapreminske gustine dodatnih gubitaka ( $p_d = p_{dx} + p_{dy}$ ) sa zapreminom navojka ( $S \cdot l$ , gde je  $S$  poprečni presek provodnika, a  $l$  obim navojka). Sabiranjem dodatnih gubitaka sa DC gubicima ( $P_{DCr} = \rho_{20} \frac{235 + \theta_r}{235 + 20} \frac{l}{S} I_r^2$ ), dolazi se do ukupnih gubitaka u provodniku  $P_{Totr} = P_{dr} + P_{DCr}$ .  $\theta_r$  predstavlja lokalnu temperaturu navojka; za bakar  $\rho_{20} = 1.68 \cdot 10^{-8} \Omega m$ . Kao što je poznato i što se vidi iz prethodnih izraza, Džulovi gubici su proporcionalni sa  $\rho$ , dok dodatni gubici opadaju sa porastom temperature i specifične električne otpornosti  $\rho$ . Ponovimo još jednu relevantnu činjenicu, da softver zasnovan na detaljnom termo-hidrauličkom modelu kao rezultat daje temperaturu svakog navojka, koja se koristi za određivanje gubitaka u njima.

U (2) su prikazani rezultati proračuna gubitaka za svaki od položaja regulatora napona; u položaju 1, kada su uključeni svi navojci višenaponskog namotaja, odnos dodatnih gubitaka i gubitaka jednosmernoj struji (Džulovi gubici), pri pretpostavljenoj uniformnoj temperaturi namotaja od  $75^\circ C$  iznosi  $100 \cdot (546.6 / 28351.5) = 1.93 \%$ , za niskonaponski namotaj i  $100 \cdot (1759.6 / 18963.1) = 9.28 \%$ , za glavni visokonaponski namotaj.

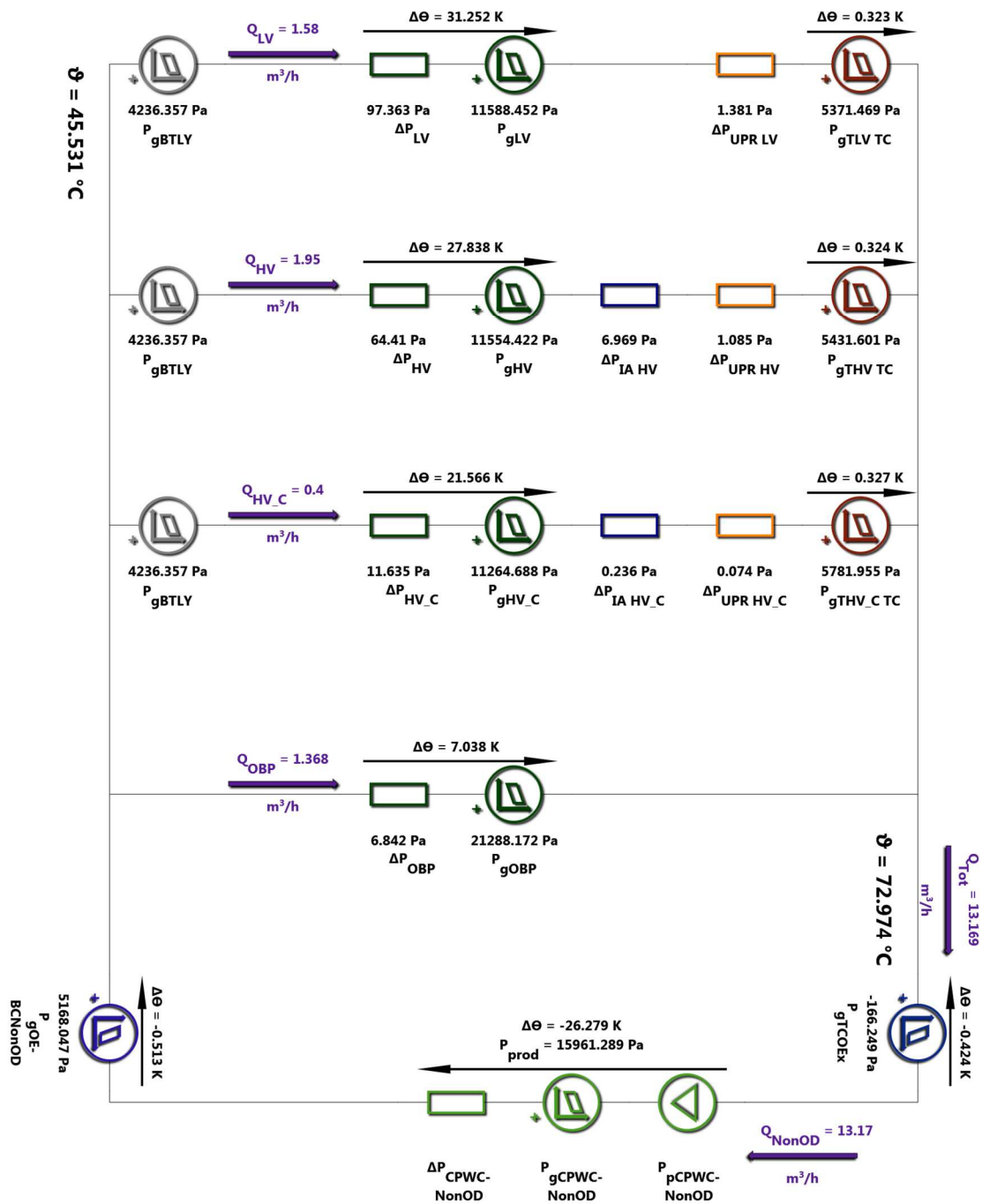
Na slici 3 je prikazana globalna raspodela protoka i pritisaka u zatvorenim konturama strujanja ulja, kao i vrednosti karakterističnih temperatura ulja na ulasku i izlasku iz pojedinih delova transformatora, za struju jednaku nominalnoj i ventilator sa najmanjim protokom.

U tabelama 3 - 6 su prikazani rezultati proračuna koji zavise i od karakteristike ventilatora i opterećenja.

TABELA 3 - REZULTATI PRORAČUNA ZA STRUJNO OPTEREĆENJE 60 %

Nominalna brzina ventilatora ( $\text{min}^{-1}$ )	$\vartheta_{LVhs}$	$\vartheta_{LVsn}$	$\vartheta_{HVhs}$	$\vartheta_{HVsn}$	$\vartheta_{gu}$	$Q_u$	$\Delta \vartheta_u$	$P_{Cu}$	$P_{sum}$
	( $^\circ C$ )	( $^\circ C$ )	( $^\circ C$ )	( $^\circ C$ )	( $^\circ C$ )	( $\text{m}^3/\text{h}$ )	(K)	(kW)	(kW)
1550	51.34	38.74	46.55	36.53	38.71	6.86	17.01	62.93	73
1440	51.41	38.85	46.61	36.66	38.76	6.92	16.86	62.97	71.49
1240	52.04	39.32	47.16	37.14	39.49	6.76	17.25	63.09	68.28
1150	52.33	39.58	47.47	37.42	39.84	6.71	17.38	63.17	67.55
930	53.3	40.41	48.62	38.28	40.92	6.58	17.72	63.36	65.65
860	53.69	40.75	49.05	38.63	41.37	6.52	17.87	63.45	65.39
620	55.5	42.53	51.13	40.56	43.47	6.41	18.22	63.89	64.7
580	56.02	42.93	51.57	40.93	43.93	6.37	18.34	63.98	64.71

$\vartheta_{LVhs}$  - temperatura najtoplije tačke niskonaponskog namotaja,  $\vartheta_{LVsn}$  - srednja temperatura niskonaponskog namotaja,  $\vartheta_{HVhs}$  - temperatura najtoplije tačke visokonaponskog namotaja,  $\vartheta_{HVsn}$  - srednja temperatura visokonaponskog namotaja,  $\vartheta_{gu}$  - temperatura gornjeg ulja,  $Q_u$  - protok ulja kroz radijatore,  $\Delta \vartheta_u$  - razlika temperatura ulja na ulasku i izlasku iz radijatora,  $P_{Cu}$  - Gubici u namotajima,  $P_{sum}$  - suma gubitaka u namotajima i potrošnje ventilatora.



Slika 3 - Raspodela protoka, pritiska i temperatura ulja za struju jednaku nominalnoj i ventilator sa najmanjim protokom)

TABELA 4 - REZULTATI PRORAČUNA ZA STRUJNO OPTEREĆENJE 80 %

Nominalna brzina ventilatora ( $\text{min}^{-1}$ )	$\vartheta_{LVhs}$	$\vartheta_{LVsn}$	$\vartheta_{HVhs}$	$\vartheta_{HVsn}$	$\vartheta_{gu}$	$Q_u$	$\Delta\vartheta_u$	$P_{Cu}$	$P_{sum}$
	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $\text{m}^3/\text{h}$ )	(K)	(kW)	(kW)
1550	64.78	48.68	58.94	45.94	47.59	9.39	22.84	115.86	125.93
1440	65.19	49.16	59.42	46.41	48.1	9.38	22.92	116.04	124.56
1240	66.17	50.06	60.44	47.37	49.16	9.31	23.11	116.41	121.6
1150	66.7	50.58	60.99	47.91	49.76	9.28	23.18	116.63	121.01
930	68.39	52.23	62.82	49.65	51.62	9.22	23.36	117.31	119.6
860	69.07	52.92	63.55	50.36	52.36	9.21	23.39	117.59	119.53
620	72.47	56.37	67.09	53.96	56.05	9.19	23.4	118.99	119.8
580	73.16	57.09	67.95	54.68	56.79	9.2	23.35	119.28	120.01

TABELA 5 - REZULTATI PRORAČUNA ZA STRUJNO OPTEREĆENJE 100 %

Nominalna brzina ventilatora (min <sup>-1</sup> )	$\vartheta_{LVhs}$	$\vartheta_{LVsn}$	$\vartheta_{HVhs}$	$\vartheta_{HVsn}$	$\vartheta_{gu}$	$Q_u$	$\Delta\vartheta_u$	$P_{Cu}$	$P_{sum}$
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(m <sup>3</sup> /h)	(K)	(kW)	(kW)
1550	80.17	61.25	73.59	58.03	58.02	12.45	27.91	188.48	198.55
1440	81.4	61.94	74.22	58.72	58.79	12.41	27.95	188.92	197.44
1240	82.82	63.48	75.79	60.33	60.4	12.45	27.9	189.86	195.05
1150	83.68	64.38	76.81	61.28	61.35	12.47	27.87	190.4	194.78
930	86.28	67.22	79.71	64.24	64.24	12.6	27.63	192.1	194.39
860	87.34	68.39	80.84	65.47	65.4	12.66	27.5	192.8	194.74
620	92.68	74.43	86.73	71.75	71.34	13.08	26.68	196.29	197.1
580	93.79	75.67	87.92	73.01	72.55	13.17	26.51	196.99	197.72

TABELA 6 - REZULTATI PRORAČUNA ZA STRUJNO OPTEREĆENJE 120 %

Nominalna brzina ventilatora (min <sup>-1</sup> )	$\vartheta_{LVhs}$	$\vartheta_{LVsn}$	$\vartheta_{HVhs}$	$\vartheta_{HVsn}$	$\vartheta_{gu}$	$Q_u$	$\Delta\vartheta_u$	$P_{Cu}$	$P_{sum}$
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(m <sup>3</sup> /h)	(K)	(kW)	(kW)
1550	98.69	76.52	90.64	72.88	69.78	16.29	31.57	283.91	293.98
1440	99.36	77.63	91.58	74.07	70.93	16.38	31.42	284.84	293.36
1240	101.92	80.12	93.97	76.62	73.38	16.55	31.16	286.82	292.01
1150	103.26	81.57	95.56	78.15	74.8	16.67	30.97	287.99	292.37
930	107.42	86.12	100.01	82.87	79.22	17.11	30.26	291.59	293.88
860	109.02	87.98	101.82	84.82	81.01	17.31	29.95	293.05	294.99
620	118.08	97.76	111.51	94.91	90.56	18.15	28.81	300.42	301.23
580	119.75	99.75	113.45	96.93	92.46	18.33	28.57	301.93	302.66

## 5 KOMENTAR REZULTATA

Za razmatrani transformator, u (2) su prikazani rezultati poređenja izračunatih temperatura i vrednosti izmerenih u ogledu zagrevanja. Ogled zagrevanja pokazuje da su porasti temperatura dosta manji od vrednosti iz standarda (7) koje su dozvoljene pri radu transformatora na lokaciji na kojoj temperatura ambijenta ne prelazi: 40 °C u bilo kom trenutku, srednju mesečnu temperaturu u najtoplijem meseci 30 °C i srednju godišnju temperaturu 20 °C: gornje ulje 35.8 K < 60 K, za srednju temperaturu namotaja 37 K < 65 K i najtopliju tačku namotaja 55.5 K < 78 K (granične vrednosti 65 K i 78 K važe za kraft papir).

Rezultati prikazani u tabelama 3 - 6 potvrđuju očekivani rezultat da sa smanjenjem brzine obrtanja ventilatora raste temperatura ulja, a posledično i temperatura namotaja.

Za suštinu istraživanja, odnosno sadržaj ovog rada, od najvećeg je značaja dobijeni rezultat da pri manjim brzinama obrtanja ventilatora rastu temperature namotaja i njihov specifični električni otpor, a posledični porast gubitaka je uglavnom manji od smanjenja potrošnje ventilatora koji se postiže pri smanjenim brzinama. U tabeli 7 je za svako od strujnih opterećenja prikazan odnos vrednosti  $P_{sum}$  (suma gubitaka u namotajima i potrošnje ventilatora) pri minimalnoj brzini ventilatora (850 min<sup>-1</sup>) -  $P_{sum\ minV}$  i pri maksimalnoj brzini ventilatora (1550 min<sup>-1</sup>) -  $P_{sum\ maxV}$ :  $R = 100 \cdot (P_{sum\ maxV} / P_{sum\ minV} - 1)$ .

Tabela 7 - Protoci vazduha i potrošnja ventilatora

Strujno opterećenje (%)	60	80	100	120
Vrednost $R$	12.8	4.93	0.42	-2.87

## 6 ZAKLJUČAK

Cilj rada je bio da se na realnom transformatoru 132 / 13.8 / 11 kV, nominalne snage u ONAF režimu rada 40 / 40 / 13.33 MVA, ispita da li postoji potencijal za uštedu energije tako što se smanjuje brzina obrtanja ventilatora za hlađenje radijatora. Smanjenje brzine dovodi do smanjenja potrošnje ventilatora, ali se zbog smanjene brzine obrtanja smanjuje koeficijent prelaska toplote sa radijatora na vazduh, time povećava ukupan toplotni otpor i temperatura ulja. Posledica povećanja temperature ulja je povećanje temperatura namotaja, zbog čega raste i dominantna komponenta Džulovih gubitaka. Rezultat izvršenih proračuna i analiza pokazuje da potencijal za smanjenje zbira gubitaka u namotaju i potrošnje ventilatora postoji, i to pre svega u zoni opterećenja ispod nominalnog, gde se zapravo može i razmišljati o smanjenju brzine ventilatora kako bi se povećala energetska

efikasnost, odnosno smanjila ukupna energija koja se gubi u transformatoru i troši na rad rashladnog sistema. Kao što je u uvodnom delu rečeno, ovaj aspekt predstavlja samo jednu od komponenti u okviru kompletne kontrole rashladnog sistema, za koju je u (1) prikazana hardverska realizacija i prvi rezultati regulacije temperature gornjeg ulja.

## LITERATURA

1. Đorđević N, Žakula D, Jevtić M, Tomašević R, Radaković Z, 2016, "Kontrola temperature uljnih transformatora promenom brzine obrtanja ventilatora", "Tehnika", "broj 1", str. 81-88, DOI:10.5937/tehnika1601081D
2. Radaković Z, Tenbohlen S, 2016. "Thermal model of oil power transformers with tap changer", "Turk J Elec Eng & Comp Sci", "Vol. 24", pp. 3293 – 3308, DOI: 10.3906/elk-1408-208.
3. Radaković Z, Šorgić M, 2009, "Precizno izračunavanje hot-spot faktora", "29. Savetovanje Cigre Srbija", "A2-02"
4. Radaković Z, Šorgić M, 2010 "Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers", "IEEE Trans. on Power Delivery", "Vol. 25, No. 2", 790-802.
5. Radaković Z, Radoman U, Kostić P, 2015, "Decomposition of the Hot-Spot Factor", "IEEE Trans. on Power Delivery", "Vol. 30, No. 1", 403-411
6. Kulkarni S.V, Khaparde S.A, 2012, "Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics", "CRC Press (Taylor & Francis Group)"
7. Standard IEC 60076-2: Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers (2011)

**POSSIBILITY OF ENERGY SAVINGS  
BY THE CONTROL OF THE COOLING SYSTEM OF OIL-IMMERSED POWER  
TRANSFORMERS**

Z. RADAKOVIĆ, FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING, UNIVERSITY OF BELGRADE, SERBIA

U. RADOMAN, FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING, UNIVERSITY OF BELGRADE, SERBIA

N. ĐORĐEVIĆ, FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING, UNIVERSITY OF BELGRADE, SERBIA

**Abstract** — Development of microcontroller technique and power electronics opened numerous possibilities for complex smart control of electrical power equipment. One of possible improvements, in terms of increase of energy efficiency, is the control of fans and pumps. Since the subject are the transformers in distribution networks, as a rule no pumps are used for such relatively small transformers and in the paper only the control of the fans will be considered. The cooling system can be changed by simple switching on / off the fans, or by varying the speed of the fans using frequency converters. Changing of the characteristics, for the same load and ambient temperature, causes the change of the temperatures inside the transformer. The losses, first of all in the windings, are temperature dependent and as a rule they increase with increase of temperature. This effect is opposite to the effect of energy savings achieved by reduction of the fan speed. The goal of this paper is to quantify the energy saving achieved by the reduction of the fan speed and the increase of the losses in the transformer appearing due to the increase of the temperature.

**Key words** — Energy efficiency, Monitoring, Cooling optimization, Detailed thermal-hydraulic network model of oil-immersed power transformer