

## Kontrola temperature uljnih transformatora promenom brzine obrtanja ventilatora

NIKOLA Z. OR EVI, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehni ki fakultet, Beograd

DANE M. ŽAKULA, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehni ki fakultet, Beograd

MILICA M. JEVTI, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehni ki fakultet, Beograd

RADOJICA Ž. TOMAŠEVI, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehni ki fakultet, Beograd

ZORAN R. RADAKOVI, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehni ki fakultet, Beograd

Originalni nau ni rad

UDC: 621.314.212

DOI: 10.5937/tehnika1601081D

*U radu je prikazan realizovani sistem za kontrolu broja obrtanja ventilatora kojima se hladi mali ogledni uljni transformator snage 6.6 kVA. Generalno, mogu nosti upravljanja i optimizacije hla enja zavise od na ina hla enja i konstrukcije transformatora; cilj upravljanja rashladnim sistemom na elno može biti smanjenje potrošnje elektri ne energije ventilatora/pumpi i održavanje temperature gornjeg ulja na konstantnoj vrednosti, kako bi se smanjilo širenje i skupljanje ulja i ulazak vlage iz vazduha. Pri tome se mora voditi ra una o ograni enjima: temperatura najtoplije ta ke (eng. hot-spot), kako njena trenutna vrednost, tako i vrednost koja bi se dostigla pri planiranom preoptere enju, ne sme da pre e dozvoljenu granicu.*

*Analize u radu se zasnivaju na vrednostima u stacionarnim toplotnim stanjima (dobijene prora unima i merenjima), pri razli itim optere enjima transformatora. Osnovni istraživa ki doprinos rada je utvr ivanje zavisnosti termi kih karakteristika transformatora od brzine obrtanja ventilatora.*

**Ključne reči:** optimizacija hla enja, AF hla enje, temperatura najtoplije ta ke, temperatura gornjeg ulja, energetski transformator

### 1. UVOD

Energetski transformatori po pravilu rade u uslovima promenljivog optere enja (promenljive struje) i temperature ambijenta. Posledno, gubici i temperatura unutar transformatora se menjaju u toku vremena. Zbog velikih masa i termi kih kapaciteta, tokom ograni enog vremena kroz transformator može proticati struja ve a od nominalne, što predvi aju i standardi za optere ivanje transformatora [1], [2]. Vrednosti temperature ulja i vrste izolacije, kao i temperatura konstruktivnih delova, pri tome moraju da budu ispod grani nih vrednosti pri kojima bi došlo do tren-

utnog ošte enja ili neprihvatljivo velikog kumulativnog pogoršanja svojstava izolacije (starenja izolacije). Zbog kompleksnosti toplotnih pojava, kao i zbog potrebe da matemati ki modeli koji se izvršavaju kontinualno (eng. on-line) budu jednostavni, u praksi postoji problem preciznog prora una temperature ulja i vrste izolacije u svakom trenutku, kao i njihova procena pri planiranom optere enju. Više o ovom problemu se može na i u [3].

Viši nivo tehni ke kompleksnosti se javlja kada se uvede kontrola rashladnog sistema, jer zbog toga dolazi do promena termi kih parametara. Upravljanje rashladnim sistemom transformatora je jedna od standardnih funkcija savremenih sistema za nadzor i upravljanje energetskim uljnim transformatorima, kao važnim i skupim elementima elektroenergetskih i industrijskih postrojenja. Uobi ajeni na ini upravljanja rashladnim sistemom su uklju enje i isklju enje ventilatora (za prinudno strujanje vazduha (AF)) i / ili

Adresa autora: Nikola or evi, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehni ki fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Rad primljen: 24.11.2015.

Rad prihva en: 11.01.2016.

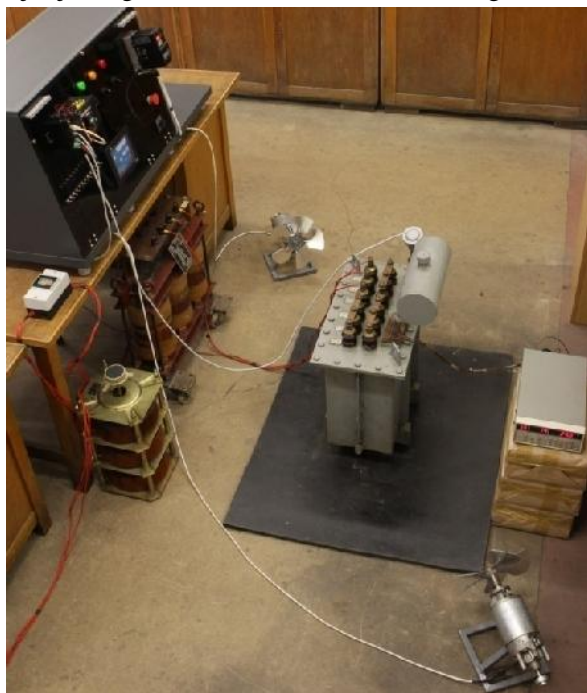
pumpi (za prinudno (OF) ili dirigovano (OD) strujanje ulja). Naprednija varijantna upravljanja je podešavanje brzine obrtanja ventilatora / pumpi, a time i protoka vazduha/ulja, koji uti u na intenzitet prenosa toplote, a time i na temperature vrste izolacije i ulja.

U radu je prikazan realizovani sistem za kontrolu brzine obrtanja ventilatora kojim se hladi mali ogledni uljni transformator snage 6.6 kVA. Na bazi izvršenih merenja i eksperimenata su diskutovane stacionarne termi ke karakteristike transformatora, u uslovima razli itih brzina obrtanja ventilatora, kao i prelaska u režim hla enja prirodnim strujanjem vazduha (AN), pri razli itim nivoima strujnog optere enja transformatora.

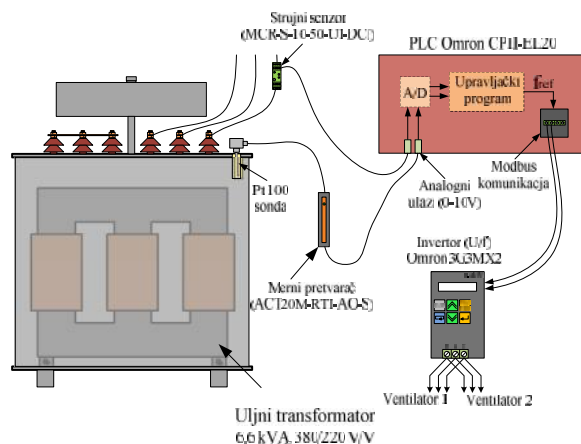
#### Opis eksperimentalne postavke

Sistem za kontrolu brzine obrtanja ventilatora je razvijen, implementiran i testiran na malom laboratorijskom transformatoru  $S=6.6$  kVA,  $U=380/220$  V/V,  $I=10/17.32$  A/A,  $f=50$  Hz,  $u_k=5\%$ ,  $Yy0$ . Testovi su vršeni na transformatoru u kratkom spoju (kratko spojeni namotaji niženaponske strane). Sistem za upravljanje brzinom obrtanja ventilatora je baziran na primeni programabilnog logi kog kontrolera (PLC).

Izgled eksperimentalne postavke je prikazan na slici 1. Na slici 2 je prikazan šema veza, odnosno formiranje informacije o struji (mereno u jednoj od faza) i o temperaturi gornjeg ulja (ulje u džepu), koje se dovode do centralnog PLC modula, i generisanje reference frekventnom pretvara u sa koga se napajaju motori ventilatora. Pored toga, vršeno je merenje lokalnih vrednosti temperatura (pomo u 11 termoparova, od kojih je 8 ugra eno unutar transformatorskog suda).

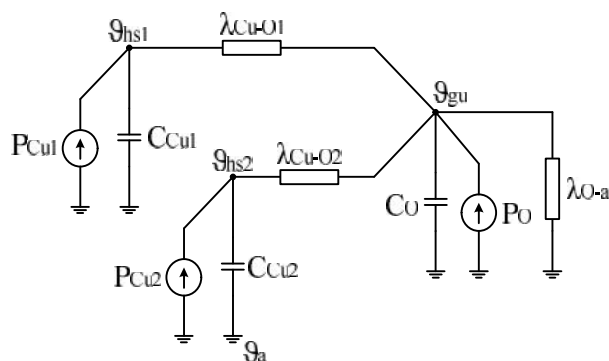


Slika 1 - Izgled eksperimentalne postavke



Slika 2 - Konfiguracija upravlja kog dela sistema termi ki model transformatora

Za odre ivanje temperatura tokom prelaznih toplotnih procesa može se koristiti toplotna šema sa tri vora, prikazana na slici 3. vorovima toplotne šeme su pridružene temeperature najtoplije ta ke (hot-spot)  $\vartheta_{hs}$  više- (1) i niže- (2) naponskog namotaja i gornjeg ulja  $\vartheta_{gu}$ . Izme u svakog od navedena tri vora i referentne ta ke toplotne šeme (koja se nalazi na temperaturi ambijenta  $\vartheta_a$ ) su povezani termi ki kapaciteti (C), svakog od namotaja ( $C_{Cu1}$  i  $C_{Cu2}$ ), odnosno ostatka transformatora - ulja, magnetnog kola, konstruktivnih delova i suda (O). U vorišta se injektiraju gubici (P): gubici u namotajima ( $C_{Cu1}$  i  $C_{Cu2}$ ) zavise od optere enja, dok se gubici u ostatku transformatora (O) sastoje od komponente (gubici u magnetnom kolu) koja se približno ne menja sa optere enjem i od komponente (gubici u konstruktivnim delovima i sudu) koja zavisi od rasutog fluksa, odnosno od optere enja. Prenos toplote izme u delova transformatora kojima su u toplotnoj šemi pridružena navedena tri vorišta je modelovan toplotnim provodnostima ( $\lambda$ ) izme u svakog od namotaja i ostatka transformatora ( $C_{Cu-O1}$  i  $C_{Cu-O2}$ ), kao i ostatka transformatora i ambijenta ( $O-a$ ).



Slika 3 - Toplotna šema sa tri vora

Za stacionarna toplotna stanja toplotna šema se pojednostavljuje tako što se iz nje izostavljaju toplotni kapaciteti.

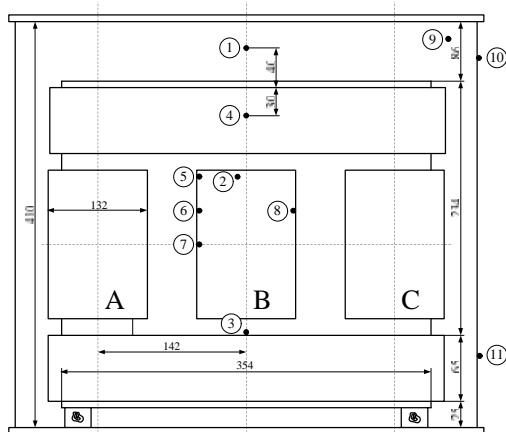
Toplotne provodnosti nisu konstantne veličine, kao što se pokazati u sledećem odeljku. U slučaju prirodnog strujanja fluida, koeficijent prelaska topline strujanjem i toplotna provodnost zavisi od temperatura, pre svega od razlike temperatura u vorišnim tačkama koje povezuje. U slučaju prinudnog strujanja fluida, koeficijent prelaska topline strujanjem i toplotna provodnost dominantno zavise od brzine strujanja fluida, koja je određena radnom tačkom pumpe / ventilatora. U slučaju korišćenja eksperimentalne postavke, radi se o transformatoru kod koga je strujanje ulja prirodno (ON), a strujanje vazduha prinudno (AF) ili prirodno (AN). Dakle, zavisnost toplotne provodnosti od brzine strujanja fluida je bila od interesa samo za toplotnu provodnost  $\lambda_{O-a}$ .

#### 4. PROMENLJIVOST TOPLOTNIH PROVDNOSTI

Određivanje zavisnosti toplotnih provodnosti od temperature/brzine strujanja fluida se može odrediti korišćenjem softvera baziranog na detaljnom termohidrauličkom modelu [4], na način sličan onome koji je korišćen u [5]. Druga mogućnost, koja je primenjena u ovom radu, je da se parametri u funkcionalnim zavisnostima toplotne provodnosti odrede iz rezultata merenja na transformatoru.

##### A. Toplotne provodnosti u ONAN režimu rada

Za određivanje ove toplotne provodnosti su korišćeni rezultati merenja prikazani u [6]. Za niz uspostavljenih stacionarnih toplotnih stanja, pri različitim strujama, pri kratko spojenoj niženaponskoj strani transformatora (sekundara), merena je srednja temperatura namotaja sekundara -  $\theta_{Cusr}$ , temperatura ambijenta -  $\theta_a$ , kao i 11 lokalnih vrednosti temperature prikazanih na slici 4 (2 sa spoljne strane suda - pozicije 10 i 11 -  $\theta_{sg}$  i  $\theta_{sd}$ , ulje u džepu (pozicija 9 -  $\theta_{gu}$ ), gornji jaram magnetnog kola (4), 3 lokalne vrednosti temperature unutar namotaja (1-3) i 4 lokalne vrednosti temperature unutar namotaja (5-8).



Slika 4 - Raspored termoparova

Iz merenih vrednosti je određivan porast temperature ( $\theta$ ): gornjeg  $\theta_{gu}$  i srednjeg ulja  $\theta_{su}$  u odnosu na ambijent, kao i najtoplije tačke namotaja -  $\theta_{hs}$  i srednje temperature namotaja -  $\theta_{Cusr}$  u odnosu na ambijent:

$$\theta_{su} = \left( \theta_{gu} - \frac{\theta_{sg} - \theta_{sd}}{2} \right) - \theta_a \quad (1)$$

$$\theta_{hs} = \theta_{gu} + 1.1 \cdot ((\theta_{Cusr} - \theta_a) - \theta_{su}) \quad (2)$$

Polazeći od rezultata merenja prikazanih u [6] formirana je tabela 1, koja je korišćena za određivanje funkcionalnih zavisnosti toplotnih provodnosti u ONAN režimu rada. Kao što je već napomenuto i kao što se vidi iz tabele 1, za namotaje je data jedna temperatura. Porasti temperature namotaja u odnosu na ulje mogu biti različiti za različite namotaje, ali njihova razlika kod dobro projektovanih transformatora treba da bude mala, što je slučaj kod razmatranog transformatora. Posledica toga je "sažimanje vorova" 1 i 2 u toplotnoj šemi (slika 3), pri čemu toplotna provodnost između vorova i ostatka transformatora postaje jednaka zbiru provodnosti ( $\lambda_{Cu-O1} + \lambda_{Cu-O2}$ ), a toplotni kapacitet u voru namotaja zbiru toplotnih kapaciteta  $C_{Cu1} + C_{Cu2}$ .

Tabela 1. Porasti temperatura i snage gubitaka u ONAN režimu rada transformatora (K)

Struja (A)	$\theta_{su}$	$\theta_{Cusr} - \theta_{su}$	$\theta_{gu}$	$\theta_{hs} - \theta_{gu}$	$P_{Cu}$ (W)	$P_{konstr}$ (W)
5.8	9.3	9.2	10.8	10.2	92	8
6.5	10.5	10.8	12.1	11.9	115	10
7.8	12.5	15.5	15	17.1	168	12
9	19.7	17	22.5	18.7	233	17
10	24.9	21.2	28.2	23.3	300	20
11	25.6	28.3	29.3	31.1	379	21
12.8	33.1	38	37.7	41.9	526	24

Toplotne provodnosti koje povezuju vor namotaja i vor ostatka transformatora su jednake količine gubitaka u namotajima i razlike temperature u ovim vorovima. Uobičajena forma funkcionalne zavisnosti toplotnih provodnosti, primenjena i u [6], glasi

$$\Lambda = K \cdot \theta^n \quad (3)$$

Detaljni toplotni proračuni [4] pokazuju da toplotne provodnosti ne zavise samo od razlike temperatura, već i od drugih parametara, na primer i od apsolutne vrednosti temperatura (to je pre svega posledica promene viskoznosti ulja, koja se intenzivno menja sa promenom temperature ulja), tako da bi precizniji proračuni zahtevali i uvođenje ovog uticaja na toplotne provodnosti. Parametri  $K$  i  $n$  su određivani minimizacijom sume kvadrata odstupanja vrednosti funkcije u svakoj tački (za svaku od snaga za koju je registrovano

stacionarno toplotno stanje) od vrednosti određenih iz merenja (kao količina snage gubitaka u namotajima i izmerenih razlika temperatura).

Opisani postupak je primenjen na toplotnu provodnost  $\lambda_{Cu-O}$ , kao i za toplotnu provodnost  $\lambda_{O-a}$  (u tom slučaju su merodavni ukupni gubici (suma gubitaka u namotajima i u konstruktivnim delovima transformatora - pošto su ogledi vršeni u kratkom spoju, snaga gubitaka u magnetnom kolu je zanemarljiva).

Opisani postupak je primenjen za dve varijante reprezentativnih temperatura u vorištima toplotne šeme: (1) najtoplija tačka i gornje ulje, kao kritične vrednosti temperatura vrste izolacije namotaja i ulja i (2) srednja temperatura namotaja i srednje ulje; srednja temperatura namotaja je korišćena za određivanje gubitaka.

Snaga gubitaka u namotajima zavisi od strujnog opterećenja i temperature namotaja i može se izraziti unavati prema sledećem izrazu:

$$P_{Cu} = \left( f \cdot \frac{235 + [\lambda_{Cu}^{ref}]}{235 + [\lambda_{Cu}^{ref}]} + (1-f) \cdot \frac{235 + [\lambda_{Cu}^{ref}]}{235 + [\lambda_{Cu}^{ref}]} \right) \cdot P_{Cu}^{ref} \cdot \left( \frac{I}{I_n} \right)^2 \quad (4)$$

gde je:  $(I/I_n)$  relativno strujno opterećenje (odnos stvarne i nominalne struje),  $f = 0.946$  odnos gubitaka koji bi se imali pri proticanju jednosmerne struje ija je vrednost jednaka efektivnoj vrednosti naizmenične struje i ukupnih gubitaka u namotajima,  $\lambda_{Cu}^{ref} = 72.2^\circ\text{C}$  referentna srednja temperatura namotaja,  $P_{Cu}^{ref} = 299.87\text{W}$  referentna snaga gubitaka u namotaju (pri referentnoj srednjoj temperaturi namotaja i nominalnoj struji). U ustaljenom toplotnom stanju važi

$$P_{Cu} = K_{1(2)} \cdot ([\lambda_{Cu} - \lambda_{su}])^{n_{1(2)}+1} \quad (5)$$

i

$$P_{Cu} + P_{konstr} = K_{2(2)} \cdot ([\lambda_{su} - \lambda_a])^{n_{2(2)}+1} \quad (6)$$

Rešavanjem sistema jednačina (4)-(6), korišćenjem vrednosti gubitaka u konstruktivnim delovima transformatora iz tabele 1, dolazi se do vrednosti srednje temperature ulja i srednje temperature namotaja u ustaljenom stacionarnom stanju pri definisanom strujnom opterećenju i temperaturi ambijenta.

Parametri  $K_{1(2)}$ ,  $n_{1(2)}$ ,  $K_{2(2)}$  i  $n_{2(2)}$  se mogu odrediti minimizacijom sume kvadrata odstupanja izrađunatih od izmerenih vrednosti temperatura  $[\lambda_{Cu}]$  i  $[\lambda_{su}]$ . Na osnovu podataka iz tabele 1 (detalji o načinu određivanja raspodele gubitaka se mogu naći u [6]), dolazi se do

$$\lambda_{1(2)} = 7.5463 \cdot (\lambda_{Cu} - \lambda_{su})^{0.1738}$$

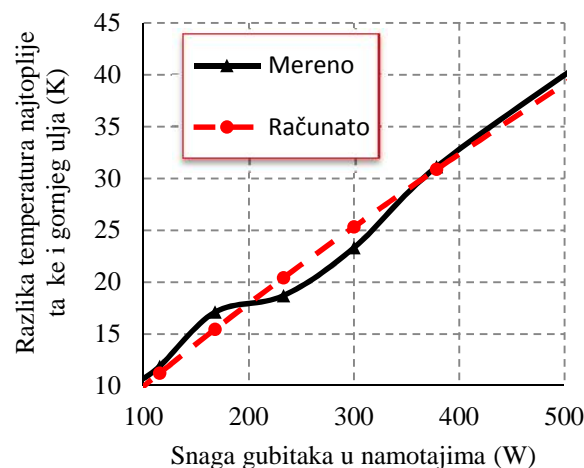
$$\lambda_{2(2)}^{AN} = 5.2296 \cdot \lambda_{su}^{0.3233}$$

Na slici 5 se dolazi i do parametara toplotnih provodnosti za najtopliju tačku namotaja i gornje ulje:

$$\lambda_{1(1)} = 6.7476 \cdot (\lambda_{hs} - \lambda_{gu})^{0.1738}$$

$$\lambda_{2(1)}^{AN} = 4.0239 \cdot \lambda_{gu}^{0.3489}$$

Ilustracije radi, na slici 5 je prikazan rezultat "fitovanja" parametara  $\lambda_{1(1)}$  iz eksperimentalno dobijenih vrednosti.



Slika 5 – Razlike temperatura najtoplije tačke namotaja i gornjeg ulja dobijene merenjima i funkcije toplotne provodnosti

Na osnovu podataka iz tabele 1, može se postaviti izraz za određivanje gubitaka u konstruktivnim delovima u zavisnosti od strujnog opterećenja:

$$P_{konstr} = 2.2265 \cdot I - 4.0223 \quad (7)$$

gde  $I$  predstavlja struju višenaponske strane. Formule (4) i (7) su korišćene za određivanje gubitaka pri radu transformatora u ONAF režimu rada, pri različitim brzinama obrtanja ventilatora i različitim opterećenjima; niz eksperimenata u ONAF režimu rada, na osnovu kojih su uspostavljene funkcionalne zavisnosti toplotnih provodnosti koje karakterišu prelazak toplote sa ulja na ambijent je prikazan u sledećem odeljku. Može se smatrati da se karakteristike prenosa toplote sa namotaja na ulje malo menjaju, odnosno da funkcionalne zavisnosti  $\lambda_{1(1)}$  i  $\lambda_{1(2)}$  ostaju približno iste.

#### B. Toplotna provodnost sa ulja na vazduh u ONAF režimu

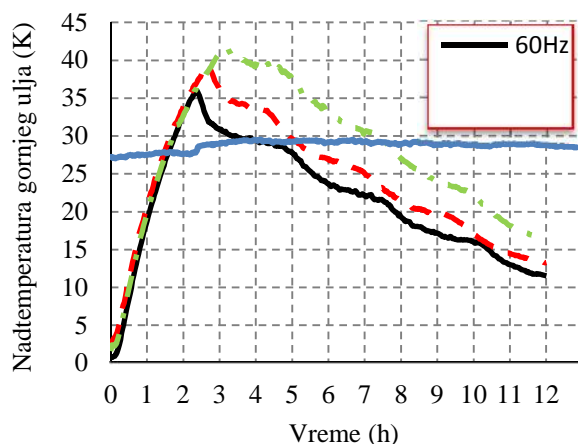
Na eksperimentalnoj postavci, prikazanoj na slici 1, izvršen je niz eksperimenata, tokom kojih su, korišćenjem razvijenog sistema za nadzor i upravljanje prikazanog na slici 2, registrovani podaci o struji i 12 lokalnih vrednosti temperatura.

Kao primer, na slici 6 je prikazana promena temperature ulja u džepu pri konstantnoj brzini obrtanja ventilatora (za svaku od ustanosti napajanja 60 Hz,

45 Hz i 30 Hz), pri emu su strujna optere enja menja-  
na u koracima 1.6, 1.4, 1.2 i 1 r.j.; sa grafika promene  
temperature se vidi da je eksperiment trajao duže od 12  
sati, zbog ega je bilo od interesa njegovo skra ivanje,  
ali bez gubitka informacije o dinamici termi kog pro-  
cesa. Eksperiment je uvek zapo injan maksimalnom  
strujom (1.6 r.j.), sa isklju enim ventilatorima, kako bi  
se transformator što pre zagrejao, posle ega je na  
motor ventilatora dovo en napon konstantne u esta-  
nosti i struja stepenasto smanjivana (od 1.6 preko 1.4 i  
1.2 do 1 r.j.). Svaki od perioda konstantnog optere enja  
je trajao dovoljno dugo da se iz njega mogu odrediti  
parametri  $k$  (stacionarna razlika temperatura gornjeg  
ulja i ambijenta) i  $\tau$  (vremenska konstanta), traženjem  
minimalne sume kvadrata odstupanja vrednosti dobije-  
nih merenjem u odnosu na vrednosti izra unate pomo-  
u funkcije

$$T_k(t) = T_{kp} + (T_k - T_{kp}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (8)$$

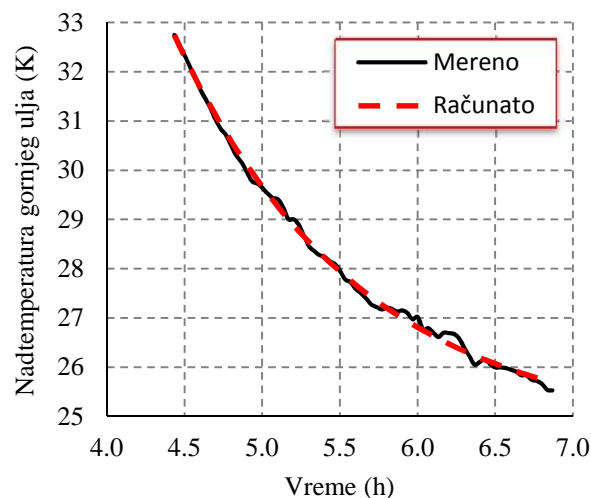
gde je  $T_{kp}$  po etna razlika temperatura. Primer primene  
koriš enog Excel-ovog alata Solver za minimizaciju  
sume kvadrata je prikazan na slici 7. Vrednosti  $k$   
dobijene primenom opisanog postupka su prikazani u  
tabeli 2.



Slika 6 – Rezultati merenja

Tabela 3 prikazuje izra unate ukupne snage gu-  
bitaka u svakom od stacionarnih stanja. One su izra-  
unavane koriš enjem formula (4) i (7), pri emu je  
srednja temperatura namotaja odre ivana kao zbir sre-  
dnje temperature ulja, odre ene iz njene promene do-  
bijene merenjem (analogno postupku opisanim u vezi  
sa slikom 7) i razlike srednje temperature namotaja i  
srednje temperature ulja (postupak se svodi na reša-  
vanje sistema od dve jedna ine, (4 i 5).

Tabela 4 prikazuje vrednosti toplotnih provodno-  
sti, dobijenih kao koli nik odgovaraju ih vrednosti  
snage (tabela 3) i razlike temperatura (tabela 2).



Slika 7 – Razlika temperatura gornjeg ulja i ambijenta  
pri delu eksperimenta za 45 Hz i struju 1.4 r.j.

Tabela 2. Razlika temperature gornjeg ulja i ambijenta  
(K) u ustaljenim toplotnim stanjima

I/I <sub>n</sub>	60 Hz	52.5 Hz	45 Hz	37.5 Hz	30 Hz
1.6	31.2	32	35.4	36.4	38.1
1.4	21.2	23.4	24.7	27	28
1.2	15.4	16.3	18.3	20.2	21.1
1	10.3	11.7	12.1	13.5	14.3

Tabela 3. Ukupne snage gubitaka (W) u ustaljenim to-  
plotnim stanjima

I/I <sub>n</sub>	60 Hz	52.5 Hz	45 Hz	37.5 Hz	30 Hz
1.6	902	906	913	917	924
1.4	653	656	658	664	667
1.2	460	461	465	467	468
1	310	312	312	312	314

Tabela 4. Toplotne provodnosti (W/(m K)) izme u ostatka  
transformatora (gornje ulje) i ambijenta

I/I <sub>n</sub>	60 Hz	52.5 Hz	45 Hz	37.5 Hz	30 Hz
1.6	28.93	28.34	25.83	25.17	24.23
1.4	30.91	28	26.69	24.55	23.83
1.2	29.95	28.24	25.34	23.13	22.21
1	29.96	26.49	25.84	23.2	21.99
Sr.vr.	29.94	27.77	25.93	24.0147	23.06

Vrednosti u tabeli 4 ukazuju da se toplotna pro-  
vodnost pri prinudnom strujanju malo menja sa opte-  
re enjem, odnosno sa promenom temperature površi  
preko koje struji vazduh.

Može se re i da je promena na nivou merne greške,  
numeri ke greške u obradi signala, kao i uticaja ter-  
mi kih parametara iji je uticaj zanemaren. Zbog toga  
je formula zavisnosti toplotne provodnosti prelaska to-  
plote na vazduh formirana na osnovu srednje toplotne

provodnosti (jedna vrednost za svaku od brzina ventilatora, određena kao srednja vrednost merenja za razlita opterećenja).

Postupkom fitovanja parametara u usvojenom izrazu zavisnosti toplotne provodnosti (izme u gornjeg ulja i ambijenta) u funkciji frekvencije napajanja motora ventilatora ( $f$ ) dobija se

$$\lambda_{2(1)}^{AF} = 23.0637 + 0.0753 \cdot (f - 30)^{1.3282} \quad (9)$$

Identičnim postupkom se dolazi i do izraza za toplotnu provodnost izme u srednjeg ulja i ambijenta:

$$\lambda_{2(2)}^{AF} = 21.7083 + 0.1488 \cdot (f - 30)^{1.1475} \quad (10)$$

## 5. REZULTATI PRORAČUNA POTREBNE BRZINE VENTILATORA

Osnovni cilj istraživanja je upravljanje radom ventilatora. Rezultati koji se daju u ovom poglavlju se baziraju na ciljnom kriterijumu upravljanja da se održava konstantna temperatura gornjeg ulja. Donja granica na vrednost frekvencije, proistekla iz praktičnih ograničenja u ostvarenoj laboratorijskoj postavci, je 30 Hz.

U tabeli 5 su prikazane vrednosti izražene u estanosti napajanja pri kojima bi se za različita opterećenja ( $I/I_n$ ) u stacionarnom toplotnom stanju uspostavila temperatura gornjeg ulja jednaka zadatoj ( $\lambda_{gu ref} = \lambda_{gu ref} + \lambda_a$ ). Vrednosti su dobijene na sledeći način: gubici u konstruktivnim delovima transformatora su određivani koristeći formulu (7), snage gubitaka u namotajima su izražavane rešavanjem sistema jednačina (4), (5) i (6), pri čemu je u izrazu (6) korišćena toplotna provodnost  $\lambda_{2(2)}^{AF}$ , ako se stacionarno stanje uspostavlja pri u estanosti napajanja većoj od 30 Hz i manjoj od nominalne u estanosti (60Hz). U tabeli 6 su prikazane izražene vrednosti temperature gornjeg ulja pri granicama frekvencijama napajanja motora ventilatora (30Hz i 60Hz), kao i u AN režimu rada ( $f=0$ ), kada je korišćena toplotna provodnost  $\lambda_{2(2)}^{AN}$ .

Tabela 5. U estanost napajanja motora ventilatora pri  $\lambda_a=20^\circ\text{C}$  pri zadatoj temperaturi gornjeg ulja

$\lambda_{gu ref}$	45	47.5	50	52.5	55
$I/I_n$					
1.6			57.5	50.3	43.4
1.4	44.5	34.2	30	*	*
1.2	*	*	*	*	

\* - Regulator radi u histerezisnom režimu (30Hz - AF i isključeni ventilatori - AN) i održava temperaturu gornjeg ulja.

Rezultati prikazani u tabeli 6 pokazuju opsege temperature gornjeg ulja u kojima je moguće vršiti regulaciju, kao i razlog zbog koga su neka polja u tabeli 5 prazna, a u neka je upisana \* (regulator radi u histerezisnom režimu).

Tabela 6. Porasti temperature gornjeg ulja (K) za granice u estanosti napajanja motora ventilatora (30Hz i 60Hz) i ONAN režim rada pri  $\lambda_a=20^\circ\text{C}$

$F$	60	30	0
$I/I_n$			
1.6	49.3	59.6	78
1.4	41.4	48.4	65.2
1.2	35.1	39.8	54.5
1	30.1	33.2	45.5

U tabeli 7 su prikazani rezultati proračuna temperature najtoplije tačke, za različite referentne temperature gornjeg ulja: prvi korak je određivanje gubitaka korišćenjem formula (4) - (7), pri čemu je u izrazu (5) korišćena toplotna provodnost  $\lambda_{1(2)}$ , a u izrazu (6) toplotna provodnost  $\lambda_{2(2)}^{AF}$ , ako se stacionarno stanje uspostavlja pri u estanosti napajanja većoj od 30 Hz, odnosno  $\lambda_{2(2)}^{AN}$  ako je u estanost napajanja ispod 30 Hz; drugi korak izražavanje porasta temperature najtoplije tačke, iz (6), pri čemu je korišćena toplotna provodnost  $\lambda_{1(1)}$ .

Tabela 7. Porasti temperature najtoplije tačke namotaja za radne tačke iz tabele 5

$\lambda_{gu ref}$	25	27.5	30	32.5	35
$I/I_n$					
1.6	90.3	90.3	91.2	94.1	97.1
1.4	71.7	74.6	75.5	82.1	84.9
1.2	62	64.7	67.3	69.3	69.3
1	50	50	50	50	50

## 6. REZULTATI MERENJA

Na eksperimentalnoj postavci je izvršen skup merenja, iz koga su u tabeli 8 prikazane vrednosti u estanosti napajanja motora za registrovana stacionarna stanja. Stacionarna stanja su nastajala kao rezultat rada primenjenog PI regulatora, sa temperaturom gornjeg ulja kao ulaznom veličinom i frekvencijom napona napajanja motora, kao izlaznom veličinom.

Tabela 8. Rezultati dejstva regulatora (u estanost napajanja motora, Hz) na laboratorijskoj postavci

$\lambda_{gu ref}$	36	27.6	18	16.7	33.3	28
$I/I_n$						
1.6	36.96				49.92	
1.4		33.23				35.93
1.2			43.2	56.4		



## 7. POREĐENJE PODATAKA DOBIJENIH MERENJEM I SIMULACIJOM

U cilju provere tačnosti formiranog matematičkog modela, izvršeni su proračuni za slučajeve za koje su izvršena merenja (tabela 8). Rezultati su prikazani u tabeli 9. Vrednosti u tabelama 8 i 9 omogućavaju poređenje procenjene u estanosti napajanja motora ventilatora da bi se ostvario zadati porast temperature gornjeg ulja u odnosu na ambijent pri specificiranim opterećenjima.

Tabela 9. Rezultati dejstva regulatora (u estanost napajanja motora, Hz) dobijeni pri simulaciji

$I/I_n$	36	27.6	18	16.7	33.3	28
1.6	37				49.83	
1.4		36.14				34.37
1.2			43.87	51.2		

## 8. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan laboratorijski prototip sistema za nadzor temperatura i upravljanje ventilatorima za hlađenje ONAN/ONAF transformatora. Temperatura gornjeg ulja je merena, a temperatura najtoplije tačke raunata preko merene temperature gornjeg ulja i merene struje, na način koji je u skladu sa standardima i koji se često primenjuje u praksi.

Prikazani su rezultati brojnih merenja, odnosno vrednosti temperatura u ustaljenim toplotnim režimima; na osnovu njih su uspostavljene funkcionalne zavisnosti koje opisuju promenljivost toplotnih parametara sa promenom brzine obrtanja ventilatora. Koliko je autorima rada poznato, ne postoje publikacije u kojima je kvalitativno analiziran uticaj promene brzine obrtaja ventilatora tokom rada transformatora, što je od velikog značaja ako se želi regulacija brzine obrtaja radi postizanja globalne optimizacije rada rashladnog sistema (najjednostavniji kriterijum je održavanje temperature gornjeg ulja na zadatoj vrednosti).

Podešavanje dinamike regulacije brzine ventilatora, kao i generisanja referentne vrednosti temperature gornjeg ulja, sa svim ograničenjima (najtoplija tačka,

gornje ulje, u svakom trenutku i pri specificiranoj rezervi preopterećenja) će biti tema naših budućih publikacija. Pored toga, analizirane su i ukupni gubici – uzimanje u obzir ne samo potrošnje ventilatora/pumpi, već i zavisnost gubitaka od srednje temperature namotaja.

## 9. ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru projekta TR 33024, „Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana EPS-a utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora i primenom novih metoda ispitivanja i daljinskog nadzora”, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] IEC Loading guide for oil-immersed power transformers, IEC Standard 60076-7, Edition 1.0, Dec. 2005.
- [2] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE Standard C57.91-1995, 1995.
- [3] Z. R. Radakovic, K. Feser. A new Method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 18, no. 4, 1284-1292, Oct. 2003.
- [4] Z. R. Radakovic, M. S. Sorgic. Basics of detailed thermal-hydraulic model for thermal design of oil power transformers, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 25, no. 2, pp. 790-802, Apr. 2010.
- [5] Z. R. Radakovic, S. Tenbohlen. Thermal model of oil power transformers with tap changer, Turk J Elec Eng & Comp Sci. [Online]. DOI:10.3906/elk-1408-208, Apr. 2015: <http://online.journals.tubitak.gov.tr/openAcceptedDocument.htm?fileID=517167&no=100137>
- [6] Radakovic, Z. Numerical determination of characteristic temperatures in directly loaded power oil transformer, European Transaction on Electrical Power (ETEP), vol. 13, no. 1, pp. 47-54, January/February 2003.

## SUMMARY

### CONTROL OF COOLING OF AN OIL-IMMERSED POWER TRANSFORMER BY VARYING SPEED OF FANS

*The paper presents a prototype system for speed control of cooling fans for a small oil-immersed 6.6 kVA transformer, implemented on a standard PLC. Generally, the potential for optimization of the cooling process depends on the accessible cooling modes and construction of the transformer; basically the aim of the cooling system control is reduction in power consumption of the fans / pumps and keeping the top-oil temperature at constant value (to reduce transformer "breathing" and infiltration of moisture). The following constraints should be taken into account: hot-spot temperature, its current value and the one which would appear for planned overloads must not exceed the allowed limit. Based on the results in steady state, the paper offers the quantitative determination of transformer thermal characteristics depending on the fan speed.*

**Key words:** Cooling optimization, AF cooling, hot-spot temperature, top oil temperature, power transformer