

# Kontrola temperature uljnih transformatora promenom brzine obrtanja ventilatora

NIKOLA Z. ĐORĐEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

DANE M. ŽAKULA, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

MILICA M. JEVTIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

RADOJICA Ž. TOMAŠEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

ZORAN R. RADAKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

Originalni naučni 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, mogućnosti upravljanja i optimizacije hlađenja zavise od načina hlađenja i konstrukcije transformatora; cilj upravljanja rashladnim sistemom načelno može biti smanjenje potrošnje električne 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 računa o ograničenjima: temperatura najtoplije tačke (eng. hot-spot), kako njena trenutna vrednost, tako i vrednost koja bi se dostigla pri planiranom preopterećenju, ne sme da pređe dozvoljenu granicu.*

*Analize u radu se zasnivaju na vrednostima u stacionarnim toplotnim stanjima (dobijene proračunima i merenjima), pri različitim opterećenjima transformatora. Osnovni istraživački doprinos rada je utvrđivanje zavisnosti termičkih karakteristika transformatora od brzine obrtanja ventilatora.*

**Ključne reči:** optimizacija hlađenja, AF hlađenje, temperatura najtoplije tačke, temperatura gornjeg ulja, energetski transformator

## 1. UVOD

Energetski transformatori po pravilu 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 tren-

utnog oštećenja ili neprihvatljivo velikog kumulativnog pogoršanja svojstava izolacije (starenja izolacije). Zbog kompleksnosti toplotnih pojava, kao i zbog potrebe da matematički modeli koji se izvršavaju kontinualno (eng. on-line) budu jednostavni, u praksi postoji problem preciznog proračuna temperature ulja i čvrste izolacije u svakom trenutku, kao i njihova procena pri planiranom opterećenju. Više o ovom problemu se može naći u [3].

Viši nivo tehničke kompleksnosti se javlja kada se uvede kontrola rashladnog sistema, jer zbog toga dolazi do promena termičkih 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. Uobičajeni načini upravljanja rashladnim sistemom su uključivanje i isključivanje ventilatora (za prinudno strujanje vazduha (AF)) i / ili

---

Adresa autora: Nikola Đorđević, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Rad primljen: 24.11.2015.

Rad prihvaćen: 11.01.2016.

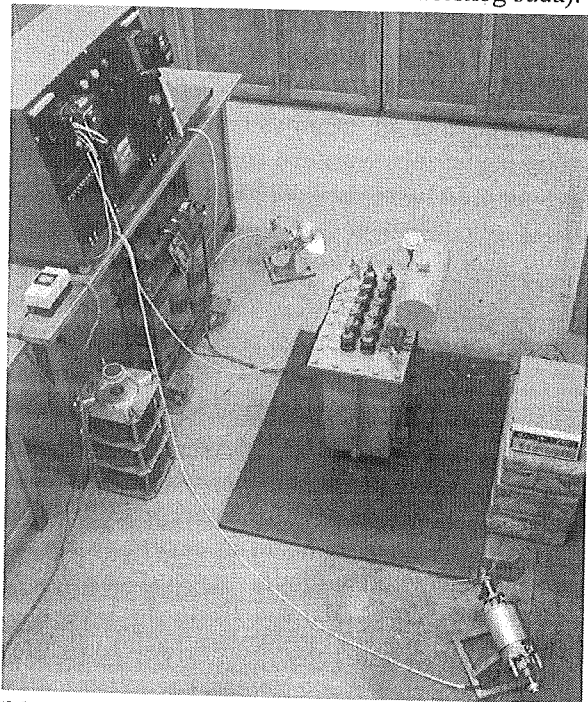
pumpi (za prinudno (OF) ili dirigovano (OD) strujanje ulja). Naprednija varijantna upravljanja je podešavanje brzine obrtanja ventilatora / pumpi, a time i protoka vazduha/ulja, koji utiču na intenzitet prenosa toplote, a time i na temperature čvrste izolacije i ulja.

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 termičke karakteristike transformatora, u uslovima različitih brzina obrtanja ventilatora, kao i prelaska u režim hlađenja prirodnim strujanjem vazduha (AN), pri različitim nivoima strujnog opterećenja transformatora.

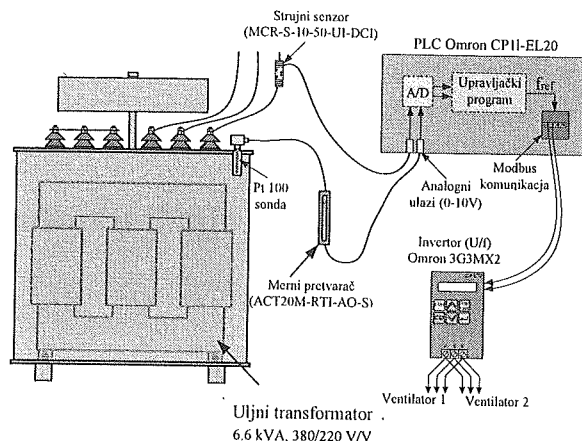
#### Opis eksperimentalne postavke

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 logičkog kontrolera (PLC).

Izgleđ eksperimentalne postavke je prikazan na slici 1. Na slici 2 je prikazana 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 pretvaraču sa koga se napajaju motori ventilatora. Pored toga, vršeno je merenje lokalnih vrednosti temperatura (pomoću 11 termoparova, od kojih je 8 ugrađeno unutar transformatorskog suda).

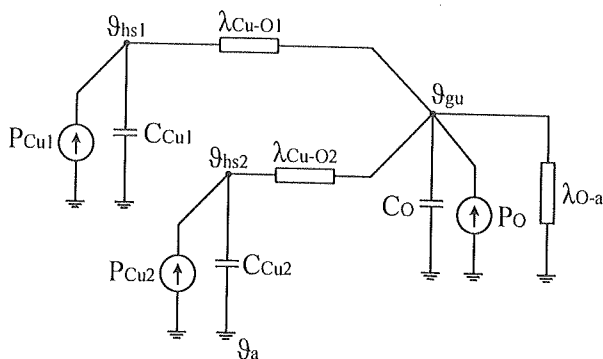


Slika 1 - Izgled eksperimentalne postavke



Slika 2 - Konfiguracija upravljačkog dela sistema termički model transformatora

Za određivanje temperatura tokom prelaznih toplotnih procesa može se koristiti toplotna šema sa tri čvora, prikazana na slici 3. Čvorovima toplotne šeme su pridružene temperature najtoplije tačke (hot-spot)  $\vartheta_{hs}$  više- (1) i niže- (2) naponskog namotaja i gornjeg ulja  $\vartheta_{gu}$ . Između svakog od navedena tri čvora i referentne tačke toplotne šeme (koja se nalazi na temperaturi ambijenta  $\vartheta_a$ ) su povezani termički kapaciteti (C), svakog od namotaja (Cu1 i Cu2), odnosno ostatka transformatora - ulja, magnetnog kola, konstruktivnih delova i suda (O). U čvorovišta se injektiraju gubici (P): gubici u namotajima (Cu1 i Cu2) zavise od opterećenja, dok se gubici u ostatku transformatora (O) sastoje od komponente (gubici u magnetnom kolu) koja se približno ne menja sa opterećenjem i od komponente (gubici u konstruktivnim delovima i sudu) koja zavisi od rasutog fluksa, odnosno od opterećenja. Prenos toplote između delova transformatora kojima su u toplotnoj šemi pridružena navedena tri čvorovišta je modelovan toplotnim provodnostima ( $\lambda$ ) između svakog od namotaja i ostatka transformatora (Cu-O1 i Cu-O2), kao i ostatka transformatora i ambijenta (O-a).



Slika 3 - Toplotna šema sa tri čvora

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

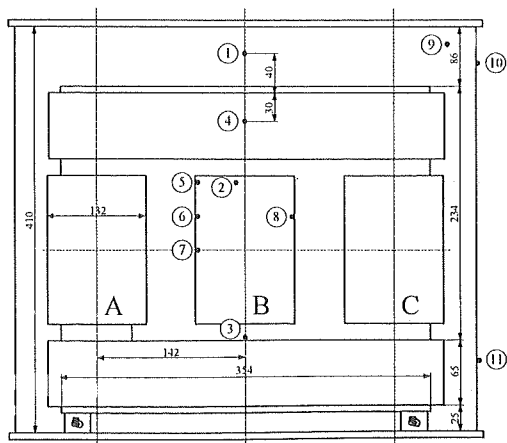
Toplotne provodnosti nisu konstantne veličine, kao što će se pokazati u sledećem odeljku. U slučaju prirodnog strujanja fluida, koeficijent prelaska toplote strujanjem i toplotna provodnost zavisi od temperatura, pre svega od razlike temperatura u čvorišnim tačkama koje povezuje. U slučaju prinudnog strujanja fluida, koeficijent prelaska toplote strujanjem i toplotna provodnost dominantno zavise od brzine strujanja fluida, koja je određena radnom tačkom pumpe / ventilatora. U slučaju korišćene 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 PROVODNOSTI

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 -  $\vartheta_{C_{usr}}$ , temperatura ambijenta -  $\vartheta_a$ , kao i 11 lokalnih vrednosti temperature prikazanih na slici 4 (2 sa spoljne strane suda - pozicije 10 i 11 -  $\vartheta_{sg}$  i  $\vartheta_{sd}$ ), ulje u džepu (pozicija 9 -  $\vartheta_{gu}$ ), gornji jaram magnetnog kola (4), 3 lokalne vrednosti temperature ulja unutar suda (1-3) i 4 lokalne vrednosti temperature unutar namotaja (5-8).



Slika 4 - Raspored termoparova

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

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

$$\theta_{hs} = \theta_{gu} + 1.1 \cdot \left( (\vartheta_{C_{usr}} - \vartheta_a) - \theta_{su} \right) \quad (2)$$

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 čvorova" 1 i 2 u toplotnoj šemi (slika 3), pri čemu toplotna provodnost između čvora i ostatka transformatora postaje jednaka zbiru provodnosti ( $\lambda_{Cu-O1} + \lambda_{Cu-O2}$ ), a toplotni kapacitet u čvoru namotaja zbiru toplotnih kapaciteta  $C_{Cu1} + C_{Cu2}$ .

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

Struja (A)	$\theta_{su}$	$\frac{\theta_{C_{usr}} - \theta_{su}}{\theta_{su}}$	$\theta_{gu}$	$\theta_{hs} - \theta_{gu}$	$P_{Cu}$ (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 čvor namotaja i čvor ostatka transformatora su jednake količniku gubitaka u namotajima i razlike temperature u ovim čvorovima. 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 količnika 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 čvorištima toplotne šeme: (1) najtoplija tačka i gornje ulje, kao kritičnih vrednosti temperatura čvrste 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 izračunavati prema sledećem izrazu:

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

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 čija je vrednost jednaka efektivnoj vrednosti naizmenične struje i ukupnih gubitaka u namotajima,  $\vartheta_{Cu}^{ref} = 72.2^\circ\text{C}$  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

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

i

$$P_{Cu} + P_{konstr} = K_{2(2)} \cdot (\vartheta_{su} - \vartheta_a)^{n_{2(2)}+1} \quad (6)$$

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 izračunatih od izmerenih vrednosti temperatura  $\vartheta_{Cu}$  i  $\vartheta_{su}$ . Na osnovu podataka iz tabele 1 (detalji o načinu određivanja raspodele gubitaka se mogu naći u [6]), dolazi se do

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

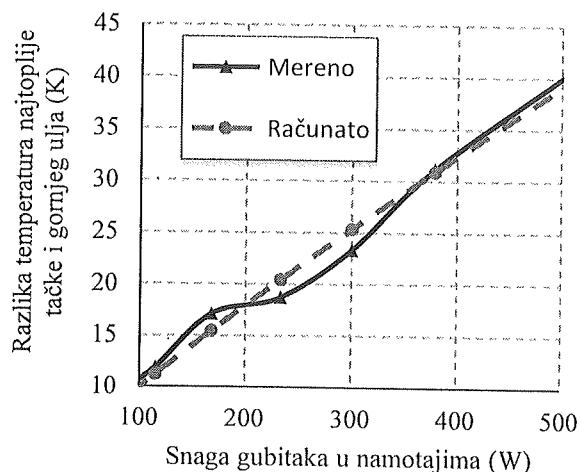
$$\lambda_{2(1)}^{AN} = 4.0239 \cdot \theta_{gu}^{0.3489}$$

Na sličan način se dolazi i do parametara toplotnih provodnosti za najtopliju tačku namotaja i gornje ulje:

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

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

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

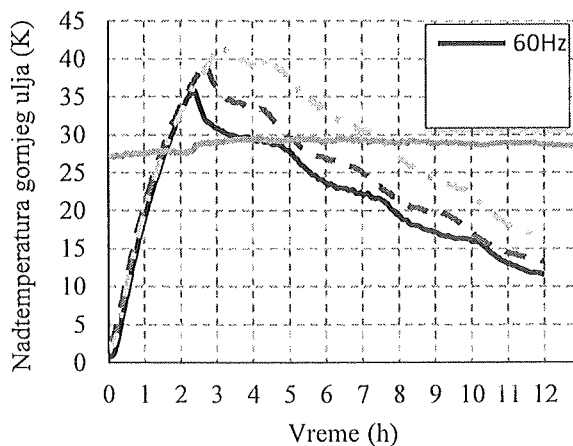
Na eksperimentalnoj postavci, prikazanoj na slici 1, izvršen je niz eksperimenata, tokom kojih su, korišćenjem razvijenog sistema za nadzor i upravljanje prikazanog na slici 2, registrovani podaci o struji i 12 lokalnih vrednosti temperatura.

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

45 Hz i 30 Hz), pri čemu su strujna opterećenja menjana 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 čega je bilo od interesa njegovo skraćivanje, ali bez gubitka informacije o dinamici termičkog procesa. Eksperiment je uvek započinjan maksimalnom strujom (1.6 r.j.), sa isključenim ventilatorima, kako bi se transformator što pre zagrejao, posle čega je na motor ventilatora dovođen napon konstantne učestalosti i struja stepenasto smanjivana (od 1.6 preko 1.4 i 1.2 do 1 r.j.). Svaki od perioda konstantnog opterećenja je trajao dovoljno dugo da se iz njega mogu odrediti parametri  $\theta_k$  (stacionarna razlika temperatura gornjeg ulja i ambijenta) i  $\tau$  (vremenska konstanta), traženjem minimalne sume kvadrata odstupanja vrednosti dobijenih merenjem u odnosu na vrednosti izračunate pomoću funkcije

$$\theta(t) = \theta_p + (\theta_k - \theta_p) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (8)$$

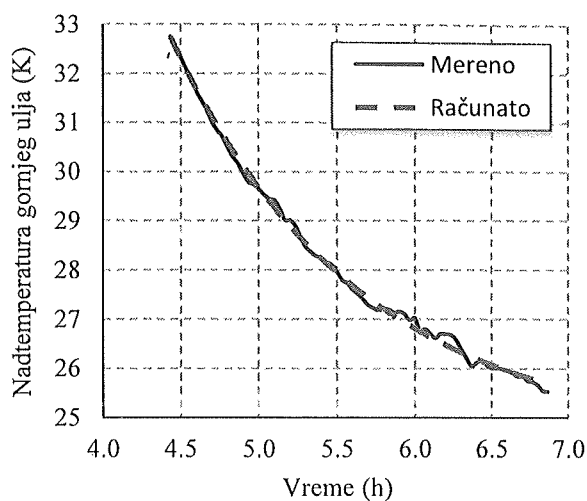
gde je  $\theta_p$  početna razlika temperatura. Primer primene korišćenog Excel-ovog alata Solver za minimizaciju sume kvadrata je prikazan na slici 7. Vrednosti  $\theta_k$  dobijene primenom opisanog postupka su prikazani u tabeli 2.



Slika 6 – Rezultati merenja

Tabela 3 prikazuje izračunate ukupne snage gubitaka u svakom od stacionarnih stanja. One su izračunavane korišćenjem formula (4) i (7), pri čemu je srednja temperatura namotaja određivana kao zbir srednje temperature ulja, određene iz njene promene dobijene merenjem (analogno postupku opisanom u vezi sa slikom 7) i razlike srednje temperature namotaja i srednje temperature ulja (postupak se svodi na rešavanje sistema od dve jednačine, (4) i (5)).

Tabela 4 prikazuje vrednosti toplotnih provodnosti, dobijenih kao količnik odgovarajućih 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

$I/I_n$	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 toplotnim stanjima

$I/I_n$	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)) između ostatka transformatora (gornje ulje) i ambijenta

$I/I_n$	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 provodnost pri prinudnom strujanju malo menja sa opterećenjem, odnosno sa promenom temperature površi preko koje struji vazduh.

Može se reći da je promena na nivou merne greške, numeričke greške u obradi signala, kao i uticaja termičkih parametara čiji je uticaj zanemaren. Zbog toga je formula zavisnosti toplotne provodnosti prelaska toplote na vazduh formirana na osnovu srednje toplotne

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

Postupkom fitovanja parametara u usvojenom izrazu zavisnosti toplotne provodnosti (između 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 između 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 granična vrednost frekvencije, proistekla iz praktičnih ograničenja u ostvarenoj laboratorijskoj postavci, je 30 Hz.

U tabeli 5 su prikazane vrednosti izračunate učestanosti napajanja pri kojima bi se za različita opterećenja ( $I/I_n$ ) u stacionarnom toplotnom stanju uspostavila temperatura gornjeg ulja jednaka zadatoj ( $\theta_{gu ref} = \theta_{gu ref} + \theta_a$ ). Vrednosti su dobijene na sledeći način: gubici u konstruktivnim delovima transformatora su određivani koristeći formulu (7), snage gubitaka u namotajima su izračunavane 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 učestanosti napajanja većoj od 30 Hz i manjoj od nominalne učestanosti (60Hz). U tabeli 6 su prikazane izračunate vrednosti temperature gornjeg ulja pri graničnim 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. Učestanost napajanja motora ventilatora pri  $\theta_a=20^\circ\text{C}$  pri zadatoj temperaturi gornjeg ulja

$\theta_{gu ref}$	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 granične učestanosti napajanja motora ventilatora (30Hz i 60Hz) i ONAN režim rada pri  $\theta_a=20^\circ\text{C}$

$f$	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 učestanosti napajanja većoj od 30 Hz, odnosno  $\lambda_{2(2)}^{AN}$  ako je učestanost napajanja ispod 30 Hz; drugi korak izračunavanje 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

$\theta_{gu ref}$	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 učestanosti 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 (učestanost napajanja motora, Hz) na laboratorijskoj postavci

$\theta_{gu ref}$	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 učestanosti napajanja motora ventilatora da bi se ostvario zadati porast temperature gornjeg ulja u odnosu na ambijent pri specificiranom opterećenjima.

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

$\theta_{gu,ref}$	36	27.6	18	16.7	33.3	28
$III_n$						
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 računata 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).

Podršavanje 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, analiziraće se 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