

## Algoritam i softver za skraćanje i obradu rezultata tipskog ogleda zagrevanja uljnih energetskih transformatora

MARKO V. NOVKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Elektrotehnički fakultet, Beograd  
ZORAN R. RADA KOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Originalni naučni rad  
UDC: 621.314.212:004.4  
DOI: 10.5937/tehnika2003333N

*Jedno od tipskih ispitivanja transformatora je ogled zagrevanja, kojim se proverava da li su karakteristične temperature namotaja i ulja ispod dozvoljenih vrednosti. Ovo je neophodno kako ne bi došlo do ubrzanog starenja i skraćanja životnog veka transformatora u slučaju da su temperature više od dozvoljenih. Pored jasnog interesa kupca transformatora, za rezultate ogleda zagrevanja su zainteresovani i proizvođači, jer mogu da provere tačnost proračunskih metoda i softvera [1], a zatim povećaju tačnost proračuna i smanje sigurnosne margine pri proračunu, pa se promenom konstrukcije približe dozvoljenim temperaturama i kao krajnji rezultat smanje utrošak materijala i troškove proizvodnje. Minimalni ogled provere je definisan IEC standardom [2].*

*Zbog velikih masa i posledičnih velikih toplotnih kapaciteta delova transformatora, tipski ogledi zagrevanja traju više sati. U radu se prikazuje algoritam, kao i njegova softverska realizacija, kojim se omogućava smanjenje vremena zauzeća ispitne stanice, utrošene energije i ukupnih troškova ogleda zagrevanja.*

**Ključne reči:** *Ogled zagrevanja, energetski transformator, optimizacija, algoritam, softver*

### 1. UVOD

Prema IEC standardu [2], tipskim ogledom zagrevanja energetskih uljnih transformatora proveravaju se porasti (u odnosu na spoljašnji rashladni fluid) karakterističnih temperatura – srednje temperature namotaja i temperature ulja ispod poklopca. Zagrevanje se vrši nominalnom snagom gubitaka (primer: za jedan transformator snage 75 MVA gubici su 400 kW, a za jedan transformator snage 750 MVA, 1,8 MW). Usled velikih masa delova transformatora, potrebno je dugo vreme da se dostigne stacionarno toplotno stanje zahtevano standardom [2], zbog čega je potrebno dugo zauzeće ispitne stanice u fabrici i značajan utrošak električne energije, što znači i visoke troškove ogleda. Zbog toga postoji praktična potreba da se dužina trajanja ogleda skрати i ostvari ušteda u utrošenoj električnoj energiji.

U radu se prikazuje algoritam koji omogućava sk-

raćenje ogleda zagrevanja, uz ispunjavanje svih kriterijuma propisanih standardom [2] i bez opasnosti od prekomernog zagrevanja transformatora. Osnovna ideja algoritma je da se na početku ogleda, dok je transformator hladan, injektira ukupna saga gubitaka koja je veća od nominalne, koja se zatim postepeno smanjuje na nominalnu vrednost. Algoritam se bazira na merenju temperature gornjeg ulja i praćenju temperature najtoplije tačke čvrste izolacije korišćenjem proračunskog postupka.

Za razvijeni algoritam ostvarena je programska podrška, koja daje preporuku osoblju u ispitnoj stanici kako da podešava snagu zagrevanja tokom ogleda zagrevanja kako bi se postiglo njegovo ciljno skraćanje. Osim preporuke za promenu snage zagrevanja, program daje informaciju kada je moguće završiti ogled. Pored toga, program omogućava kompletnu obradu rezultata tipskog ogleda zagrevanja: na osnovu rezultata merenja proračunava karakteristične poraste temperature i generiše odgovarajući izveštaj.

### 2. TIPSKI OGLED ZAGRE VANJA ULJNIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Uobičajeno, ogledom zagrevanja se u ustaljenom toplotnom stanju pri nominalnim radnim uslovima

Adresa autora: Marko Novković, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

e-mail: novkovic@etf.rs

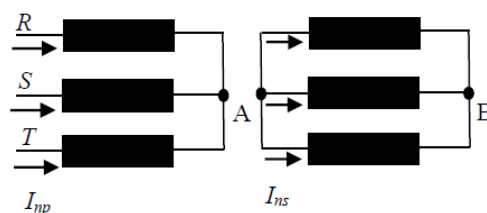
Rad primljen: 21.03.2020.

Rad prihvaćen: 25.05.2020.

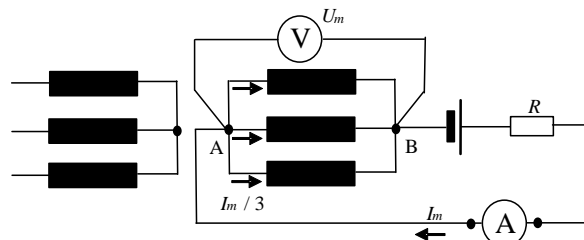
(nominalna struja i nominalni napon), proveravaju porasti temperature gornjeg ulja, srednje temperature namotaja i najtoplije tačke namotaja.

Iz praktičnih razloga ogled zagrevanja se sprovodi na transformatoru sa kratko spojenom niže-naponskom stranom (slika 1), kako je to definisano međunarodnim IEC standardom [2]. Prema [2], tipski ogled zagrevanja se izvodi iz dva odvojena dela:

- U prvom delu ogleda struja se podešava na vrednost koja je nešto viša od nominalne, a pri kojoj se generišu ukupni nominalni gubici (zbir gubitaka u namotajima pri proticanju nominalne struje, pri temperaturi od 75°C i nominalnih gubitaka u magnetskom kolu). U toku ovog dela ogleda prate se temperatura gornjeg ulja i temperatura spoljašnjeg rashladnog fluida i test se završava kada porast temperature ulja (porast temperature se definiše u odnosu na spoljašnji rashladni fluid) uđe u ustaljeno stanje. Kriterijum dostizanja ustaljenog stanja je da brzina promene temperature gornjeg ulja opadne ispod 1°C/h i da se takav gradijent održava tri sata (pri tome se ne smeju menjati gubici). Standard dozvoljava i izvesno odstupanje ukupnih gubitaka od nominalne vrednosti i definiše način za svođenje izmerenih vrednosti porasta temperature na vrednosti pri nominalnim ukupnim gubicima ( $\theta_{gun}$ ).
- Nakon završetaka prvog dela ogleda, prelazi se na drugi deo, tako što se struja smanji na nominalnu i na toj vrednosti održava sat vremena. U tom periodu se mere temperature ulja (gornjeg i donjeg) i spoljašnjeg rashladnog fluida, barem jednom na svakih 5 minuta. Nakon isteka jednog sata isključuje se napajanje i primenom UI metode meri otpornost namotaja. To zahteva razvezivanje naizmenničnog kola sa slike 1 i formiranje mernog kola jednosmerne struje, čiji je princip prikazan na slici 2. Temperatura namotaja se određuje iz navedene izmerene vrednosti otpora i vrednosti otpora koja je izmerena pre početka zagrevanja, kada je temperatura namotaja jednaka temperaturi ambijenta (primenom šeme sa slike 2 može se doći samo do srednje vrednosti otpora namotaja, a ne i do otpora namotaja svake od faza, jer se meri otpor tri paralelno vezana namotaja). Pri tome se koriste opšte poznate zavisnost otpora od temperature, pri čemu koeficijent linearne zavisnosti otpora od temperature zavisi od vrste materijala od koga je izrađen namotaj. Primenom ove metode dolazi se do srednjih vrednosti temperature namotaja. Slično kao i u prvom delu ogleda, standard dopušta izvesno odstupanje vrednosti struje od nominalne i daje odgovarajuće izraze za svođenje vrednosti na slučaj sa nominalnom strujom.



Slika 1 – Šema ogleda zagrevanja



Slika 2 – Šema merenja otpora namotaja jednosmernom strujom

Za primenu opisane metode, sa prekidom napajanja i razvezivanjem naizmenničnog kola, odnosno prevezivanjem sa šeme 1 na šemu 2 i uspostavljanjem konstantne merne struje  $I_m$ , potrebno je izvesno vreme, tokom koga će se namotaj ohladiti u odnosu na vrednost koja se imala neposredne pre isključenja naizmenničnog napajanja, zbog čega će se i otpor namotaja jednosmernoj struji smanjiti u odnosu na vrednost pre prekidanja naizmennične struje. Zbog toga je potrebno snimiti krivu promene otpora u određenom periodu nakon uspostavljanja konstantne struje  $I_m$  ( $R_{DC} = U_m / I_m$ ). Iz snimljenih vrednosti  $R_{DC}$  se može dobiti i izraz za promenu temperature tokom hlađenja namotaja, a zatim izvršiti ekstrapolacija krive do trenutka prekidanja naizmennične struje, odnosno dobiti srednja temperatura namotaja u trenutku isključenja transformatora.

Oduzimanjem srednje temperature ulja u trenutku prekidanja naizmenničnog napajanja od ekstrapolirane srednje temperature namotaja dobija se vrednost gradijenta srednje temperature namotaja u odnosu na srednju temperaturu ulja pri nominalnoj struji ( $\Delta\theta_{sn-sun}$ ). Sabiranjem ovog gradijenta temperature sa porastom srednje temperature ulja, određenim u prvom delu ogleda ( $\theta_{sun}$ ), dobija se porast srednje temperature namotaja ( $\theta_{sm}$ ) pri nominalnim radnim uslovima na mreži. Ova vrednost treba da bude manja od garantovane.

Pored ove vrednosti, provera se vrši i za porast temperature gornjeg ulja određen u prvom delu ogleda ( $\theta_{gun}$ ). Maksimalni dozvoljeni porasti temperatura za uljne transformatore pri nominalnom opterećenju u stacionarnom stanju, prema [2], prikazani su u tabeli 1. Porast temperature najtoplije tačke (hot-spot) je jednak

$$\theta_{hsn} = \theta_{gun} + H\Delta\theta_{sn-sun}, \quad (1)$$

gde je  $\theta_{gun}$  vrednost određena u prvom delu oglada zagrevanja,  $\Delta\theta_{sn-sun}$  vrednost određena u drugom delu oglada, dok  $H$  predstavlja faktor najtoplije tačke, čija je vrednost poznata ili iz proračuna ili na bazi iskustva za određenu klasu transformatora.

Tabela 1. Maksimalni dozvoljeni porasti temperature

Granica za	Maks. porast temp. [K]
Gornje ulje	60
Srednja temperatura namotaja: ON.. i OF.. hlađenje	65
OD.. hlađenje	70
Najtoplija tačka namotaja	78

### 3. ALGORITAM ZA SKRAĆENJE TIPSKOG OGLEDA ZAGREVANJA

Kako je dužina trajanja drugog dela oglada propisana standardom (1h), ogled je moguće skratiti jedino u prvom delu. Osnovna zamisao je da se na početku oglada struja podesi na vrednost pri kojoj su gubici veći od ukupnih nominalnih gubitaka, kako bi se transformator što pre zagrejao, a da se zatim struja smanji tako da se gubici podese na ukupne nominalne gubitke.

Proces zagrevanja se može podeliti na tri dela, pri čemu program definiše prelazak na sledeći deo. U toku prvog dela injektira se snaga gubitaka koja je veća od ukupne nominalne snage gubitaka. Drugi deo počinje kada program preporuči da je potrebno injektirati ukupnu nominalnu snagu gubitaka, i u tom periodu je dozvoljeno menjati snagu gubitaka, iako program to ne preporučuje. Kada se merena temperatura gornjeg ulja približi ustaljenoj vrednosti (nju ekstrapolira program na osnovu toka zagrevanja transformatora) na manje od 3°C, algoritam ulazi u treći deo u toku koga nije dozvoljeno menjati snagu gubitaka i na osnovu kriterijuma iz standarda [2] se procenjuje kada je moguće završiti ogled.

#### 3.1. Prvi deo oglada: Injektiranje snage ukupnih gubitaka koja je veća od nominalne

Vrednost maksimalne snage mora biti pažljivo odabrana, kako bi se izbegao rizik pregrevanja. U tom smislu, treba uvažiti sva ograničenja koja se postavljaju u standardu za opterećivanje transformatora [3]. Ukoliko se ubrzani ogled zagrevanja, koji se na transformatoru izvodi samo jednom, tretira blago, kao da se radi o dugotrajnom cikličnom preopterećenju [3], mogu se primeniti granice za maksimalno strujno preopterećenje transformatora ( $\beta_{max}$ ): za male<sup>1</sup> transformatore 1,8 relativnih jedinica (naša je preporuka da se i za

ove transformatore koristi granica 1,5 (kao za srednje transformatore)), za srednje<sup>1</sup> 1,5 relativnih jedinica, a za velike<sup>1</sup> 1,3 relativnih jedinica. Teorijski, maksimalna dozvoljena snaga injektiranja gubitaka ( $P_V^{max}$ ) se određuje kao:

$$P_V^{max} = \max\{P_{Cu,n}\beta_{max}^2, P_{Cu,n} + P_{Fe,n}\} \quad (2)$$

gde je  $P_{Cu,n}$  snaga nominalnih gubitaka usled proticanja struje (dobija se tako što se vrednost izmerena u ogledu kratkog spoja pri nominalnoj struji proračuna na 75°C), a  $P_{Fe,n}$  snaga nominalnih gubitaka usled magnetskog fluksa u magnetskom kolu (vrednost koja se određuje iz oglada praznog hoda pri nominalnom naponu). Izraz (2) pokriva i praktično malo verovatan slučaj  $P_{Fe,n} > (\beta_{max}^2 - 1)P_{Cu,n}$ . Dakle,  $P_V = P_{Cu,n}\beta_{max}^2$  praktično predstavlja vrednost najvećih gubitaka koji se mogu podesiti, a koji dovode do maksimalnog skraćenja oglada zagrevanja, bez potencijalnih lokalnih pregrevanja, zbog kojih je u standardima postavljena granica za maksimalno relativno strujno opterećenje  $\beta_{max}$ . Dakle, strujno opterećenje ne sme ni na početku zagrevanja preći  $\beta_{max}$ . Tokom zagrevanja temperature rastu, tako da će, kao što će se objasniti u nastavku teksta, ograničenje snage zagrevanja biti diktirano maksimalnom dozvoljenom temperaturom najtoplije tačke izolacije.

Da bi se sproveo algoritam prikazan u nastavku teksta, kao ulazne podatke, dobijene tokom termičkog proračuna u fazi projektovanja transformatora, za svaki od namotaja je potrebno zadati vrednosti faktora najtoplije tačke ( $H^{pr}$ ), nominalnog porasta temperature gornjeg ulja u odnosu na spoljašnji rashladni fluid ( $\theta_{gun}^{pr}$ ), nominalnog gradijenta temperature namotaja u odnosu na temperaturu ulja ( $\Delta\theta_{sn-sun}^{pr}$ ) i nominalnog porasta temperature najtoplije tačke ( $\theta_{hsn}^{pr}$ ), koji se određuje po izrazu (1).

Kada počne ogled zagrevanja periodično (na 15 min) se očitavaju temperature ambijenta ( $\vartheta_{amb}$ ), gornjeg ( $\vartheta_{gu}$ ) i donjeg ( $\vartheta_{du}$ ) ulja, a pored toga beleže se i vrednosti injektirane snage gubitaka ( $P_V$ ) i vremenski trenutak kada je očitavanje izvršeno ( $t$ ). Na osnovu ovih podataka za svaki od namotaja transformatora izračunava se temperatura najtoplije tačke ( $\theta_{hs,i}$ ), kao zbir dve komponente (forma kao u izrazu (1)), pri čemu faktor  $H$  ima konstantnu vrednost, a porast temperature namotaj-ulje se izračunava kao zbir dve eksponencijalne funkcije [3], oblika koji ima prebačaj, odnosno tokom prelaznog režima dostiže vrednost koja je veća od vrednosti u stacionarnom stanju. Proverava se da li je porast temperature najtoplije tačke svakog od namotaja ispod maksimalno dozvoljene vrednosti tj. ispunjenost uslova  $\theta_{hs,i} < \theta_{hs,max,i}$ , pri čemu je usvojeno da u prvih 90 minuta oglada zagrevanja

<sup>1</sup>Definisano u standardu [3]

porast temperature može da dostigne vrednost koja je u standardima [3] dozvoljena za normalno ciklično opterećivanje:  $\theta_{hs\ max,i} = 100K$ . Nakon isteka prvih 90 minuta vrednost  $\theta_{hs\ max,i}$  se postavlja na vrednost  $\theta_{hsn}^{pr}$ . Primenom prethodno opisanog postupka određivanja  $\theta_{hs\ max,i}$  postiže se maksimalno skraćanje ogle-da zagrevanja – u prvih 90 minuta snaga zagrevanja se određuje kao maksimalna snaga pri kojoj se ne prelaze bezbedne granice temperature najtoplije tačke (pri tome se uvažava i prebačaj temperature tokom prelaznog toplotnog procesa). Nakon tog perioda prelazi se na koncept da se spreči da porast temperature najtoplije tačke pređe nominalnu vrednost, jer bi se u tom slučaju ogled zagrevanja produžio usled potrebnog vremena da se transformator hladi.

Ukoliko je za bar jedan od namotaja ispunjen uslov  $\theta_{hs,i} > \theta_{hs\ max,i}$ , određuje se indeks namotaja ( $i_{max}$ ) za koji je razlika  $\theta_{hs,i} - \theta_{hs\ max,i}$  maksimalna. Sledeći korak je da se odredi vrednost preporučene snage ( $P_Y^{prep}$ ), na koju treba smanjiti trenutnu snagu zagrevanja  $P_Y$ . Ona se određuje tako da vrednost porasta temperature najtoplije tačke u stacionarnom stanju (za najtopliji namotaj) bude manja od maksimalno dozvoljene vrednosti za izvesnu sigurnosnu marginu (usvojena je vrednost od 5°C), kojom se ostavlja određena temperaturna razlika za predstojeći dalji porast temperature gornjeg ulja:

$$P_Y^{prep} = P_{Cu,n} \left( \frac{\theta_{hs\ max,i_{max}} - \theta_{gu} - 5}{H_{i_{max}} \Delta \theta_{sn-sun,i_{max}}^{pr}} \right)^{2/y} \quad (3)$$

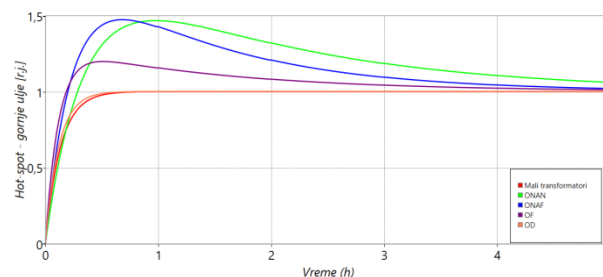
Smanjenje temperaturne margine povećava dinamiku promene  $P_Y^{prep}$ , a vrednost od 5°C je usvojena na osnovu iskustvenog poznavanja procesa i izvršenih numeričkih testova.

Ukoliko je  $P_Y^{prep}$  veće od  $P_Y^{ust.st.}$  (po pravilu,  $P_Y^{ust.st.} = P_{Cu,n} + P_{Fe,n}$ , čime se izbegava preračunavanje porasta temperature gornjeg ulja – videti tačku 1. u odeljku 2.) preporučena vrednost snage gubitaka jednaka je onoj koja se dobija proračunom; u suprotnom, preporučena vrednost je jednaka  $P_Y^{ust.st.}$ . U trenutku kada preporučena vrednost snage gubitaka postane jednaka  $P_Y^{ust.st.}$ , prvi deo algoritma se završava i prelazi se na sledeći.

Iskustvo tokom testiranja algoritma pokazuje da je moguće da se dogodi da u toku perioda od 90 minuta porast temperature gornjeg ulja premaši nominalnu vrednost, pri čemu porast temperature najtoplije tačke ne dostiže vrednost od 100K. Ukoliko se ne bi uvela dodatna regulacija u algoritam, u ovakvim slučajevima bi došlo do neželjenog produženja ogle-da zagrevanja (usled potrebnog vremena da se transformator hladi). Zbog toga je, pored postojećeg uslova za smanjenje  $\theta_{hs\ max,i}$ , potrebno dodati još jedan, po kome se

$\theta_{hs\ max,i}$  smanjuje ukoliko se vrednost porasta temperature gornjeg ulja izračunata prema [3], na kraju mernog perioda od 15 min, približi nominalnom porastu na manje od 5°C. Vrednost 5°C je usvojena imajući u vidu uslov za završetak prvog dela ogle-da (gradijent promene manji od 1°C/h u periodu od 3h) i realnu pretpostavku da su proračunske vrednosti (bazirane na primeni sigurnosnih margina) nešto veće od stvarnih.

U prethodnim tekstu je pomenuto da, prema proračunskom algoritmu iz [3], vrednost  $H\Delta\theta_{sn-su}$  ima prebačaj u odnosu na stacionarnu vrednost. Najveća vrednost prebačaja gradijenta temperature najtoplije tačke i gornjeg ulja (u relativnim jedinicama u odnosu na nominalnu) javlja se u periodu između 30 minuta i jednog sata od početka procesa zagrevanja (na slici 3 su date vrednosti za četiri tipa transformatora), na osnovu čega je definisan prethodno navedeni period od 90 minuta.



Slika 3 – Promena razlike temperature najtoplije tačke i gornjeg ulja, pri zagrevanju iz hladnog stanja nominalnom strujom

### 3.2. Drugi deo ogle-da: Injektiranje snage gubitaka koja je jednaka ukupnim nominalnim gubicima, sa mogućnošću promene

U ovom delu algoritma preporučena snaga gubitaka je jednaka snazi ukupnih (nominalnih) gubitaka u ustaljenom stanju, ali je temperatura gornjeg ulja transformatora „dovoljno daleko“ od ustaljenog stanja, pa je tehničaru u ispitnoj stanici dozvoljeno da menja snagu gubitaka.

Odluka o prelasku na treći deo ogle-da se vrši na osnovu vrednosti porasta temperature gornjeg ulja u ustaljenom stanju, koja se dobija ekstrapolacijom sadašnjeg toka promene porasta temperature gornjeg ulja. Uslov za prelazak na treći deo je da je trenutna vrednost porasta temperature gornjeg ulja ( $\theta_{gu}^{tren} = \vartheta_{gu} - \vartheta_{amb}$ ) manja od ekstrapolirane ustaljene vrednosti porasta temperature gornjeg ulja ( $\theta_{gu,ust}$ ) za manje od 3°C tj. potrebno je da važi:

$$\theta_{gu,ust} - \theta_{gu}^{tren} < 3^{\circ}C \quad (4)$$

Ekstrapolacija se vrši na uprošćen način. Smatra se da se snaga zagrevanja ne menja i da je jednaka ukupnim nominalnim gubicima, dok pri primeni algoritma za skraćanje ogle-da zagrevanja to nije slučaj (videti



odeljak 3.1.). Ipak, ta greška nije prevelika jer je period u kome je snaga zagrevanja veća od nominalne relativno kratak – primena postupka pokazuje da se on se nalazi na linearnom delu krive zagrevanja, dok se uslov (4) proverava tek kada nagib opadne ispod polovine početne vrednosti, u periodu kada je snaga zagrevanja blizu nominalne vrednosti. Dakle, broj tačaka pri kojima je snaga veća od nominalne je dosta manji od broja tačaka pri kojima je snaga bliska nominalnoj, tako da postupak dovodi do vrednosti estimirane temperature gornjeg ulja pri nominalnim ukupnim gubicima čije odstupanje od tačne vrednosti nije veliko, na osnovu čega je doneta odluka da se primeni ovaj pojednostavljen postupak. Određivanje vrednosti  $\theta_{gu,ust}$  se vrši na osnovu svih vrednosti temperature gornjeg ulja koje su izmerene do tog trenutka. Polazeći od usvojene aproksimacije za snagu zagrevanja, promena porasta temperatura gornjeg ulja se vrši približno po eksponencijalnom zakonu sa jednom vremenskom konstantom:

$$\theta_{gu}(t) = \theta_{gu,ust} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (5)$$

gde je  $\theta_{gu,ust}$  porast temperature gornjeg ulja u ustaljenom stanju, a  $\tau$  vremenska konstanta procesa zagrevanja ulja. Ova dva parametra se dobijaju kao rezultat primene ekstrapolacione metode.

### 3.3. Injektiranje snage gubitaka koja je jednaka ukupnim nominalnim gubicima, bez mogućnosti promene

U poslednjem delu algoritma, koji počinje nakon što je zadovoljena nejednakost (4), injektirana snaga gubitaka jednaka je snazi ukupnih gubitaka u ustaljenom stanju ( $P_V^{ust.st.}$ ). Standard [2] ne dozvoljava promenu snage zagrevanja u ovom periodu kako bi ogled zagrevanja bio validan.

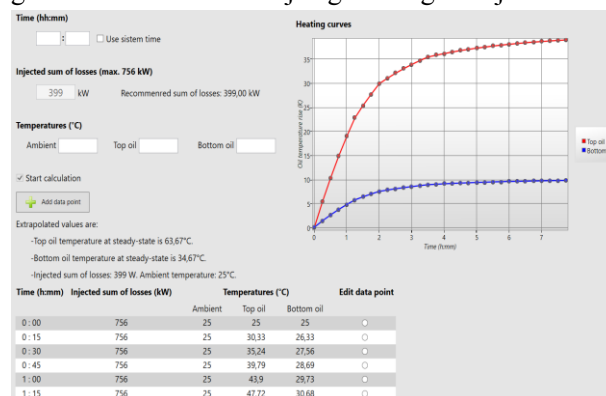
Takođe, standard [2] precizno definiše i uslov za završetak prvog dela ogleada (u toku tri uzastopna sata promena porasta temperature gornjeg ulja je ispod 1°C/h). Za vrednosti temperatura gornjeg i donjeg ulja uzima se aritmetička sredina temperatura u toku poslednjeg od ova tri sata.

## 4. RAZVIJENI SOFTVER

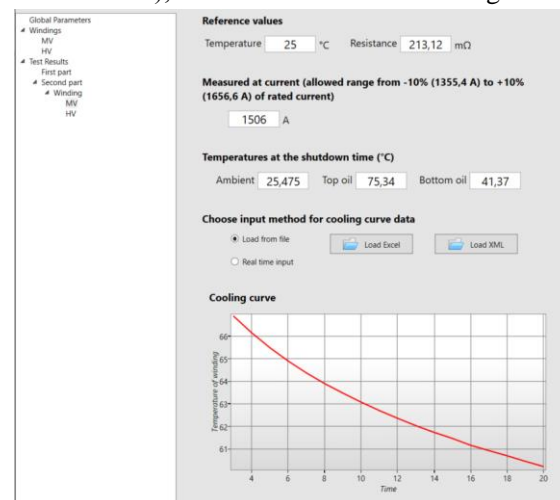
Razvijeni programski alat sadrži dva dela: 1. Određivanje karakterističnih temperatura na osnovu ogleada zagrevanja sprovedenim u skladu sa standardom [2] i 2. preporuke kako menjati snagu zagrevanja tokom ogleada kako bi se ostvarilo njegovo skraćenje.

Od ulazih podataka potrebno je uneti osnovne podatke o transformatoru i vrednosti određene u fazi projektovanja (nominalna snaga, način hlađenja, nominalne snage gubitaka (usled proticanja struje i u magnetskom kolu), dozvoljeni porasti karakterističnih temperatura) i osnovne podatke o svakom od namotaja

(nominalna struja, faktor najtoplije tačke, gradijent srednja temperatura namotaja minus srednja temperatura ulja). Nakon toga unose se rezultati prvog i drugog dela ogleada. Kada je u pitanju prvi deo ogleada, postoje dve mogućnosti: 1) ukoliko je ogled završen, unose se vrednosti porasta temperature gornjeg i donjeg ulja u ustaljenom stanju (na kraju prvog dela ogleada); 2) ukoliko se podaci unose u toku samog ogleada, unose se trenutne izmerene vrednosti temperature gornjeg i donjeg ulja i injektirane snage gubitaka (slika 4); ovakav unos podataka se vrši u slučaju da se program koristi i za skraćenje ogleada zagrevanja.



Kada je u pitanju drugi deo ogleada, unosi se referentna vrednost otpornosti namotaja, temperatura pri kojoj je ona merena, struja koja je održavana tokom drugog dela ogleada, temperature gornjeg i donjeg ulja u trenutku prekidanja napajanja i krive hlađenja za svaki od namotaja. Za unos krivih hlađenja postoje dva načina: 1) ukoliko je ogled završen učitavaju se iz fajla (*MS Excel* ili *XML*), prikazano na slici 5; 2) podatke je moguće unositi u program (unos izmerenih vrednosti za svaku tačku), što se može vršiti i u toku ogleada.



Slika 5 – Deo korisničkog interfejsa za unos rezultata drugog dela ogleada

Pored navedenih proračuna, i provere ispunjenosti uslova iz [2] (tabela 1), program vrši proračun još nekih porasta temperature, koji nisu zahtevani standardom, ali su bitni za termičko projektovanje (npr. porast temperature namotaja u odnosu na ulje u namotaju). Prikaz metode za određivanje ovih dodatnih, za praksu bitnih, porasta temperatura ostaje za eventualnu buduću publikaciju. Izgled jedne od stranica programa na kojima se prikazuju rezultatu dat je na slici 6. Program generiše odgovarajuće izveštaje (MS Excel, PDF, XPS).

Temperatures after injecting the sum of losses of 266,6 kW		Recalculated to total rated losses of 266,6 kW	
Ambient temperature	25,475 °C		
Top oil temperature rise	51,2 K	51,19 K	
Bottom oil temperature rise	16,9 K	16,9 K	
Average radiator oil temperature rise	34,05 K	34,05 K	

Temperatures after injecting the constant current during 1 hour		Recalculated to rated current	
Winding system MV			
Rated current	1506,00 A		
Measured at current	1506,00 A		
Average winding to average oil inside the radiator temperature difference	11,08 K	11,08 K	
Average winding to average oil inside the winding temperature difference	9,03 K	9,03 K	
Longitudinal temperature rise of the oil inside winding	38,07 K	38,07 K	
Average oil temperature rise of the oil inside the radiator	32,88 K	32,88 K	
Longitudinal temperature rise of the oil inside the radiator	33,97 K	33,97 K	
Average oil temperature rise of the oil inside the winding	34,93 K	34,93 K	

Slika 6 – Deo korisničkog interfejsa za prikaz rezultata

## 5. REZULTATI PRIMENE ALGORITMA

Motivacija za razvoj algoritma i programskog alata je nastala tokom nedavnih eksperimentalnih istraživanja [4], tokom kojih je izveden veliki broj termičkih testova, zbog čega je postojao veliki pritisak da se svaki ogled što više skрати, što je rađeno korišćenjem priručnih malih programskih alata. Softver zbog toga još uvek nije primenjen tokom stvarnih oglada zagrevanja. U radu se prikazuje inicijalni skup testova na sintetičkim signalima (vrednostima temperatura gornjeg i donjeg ulja dobijenih pomoćnim softverskim alatom koji omogućava simulaciju promene u toku prvog dela oglada zagrevanja).

Testovi na bazi sintetičkih signala su izvršeni za pet različitih transformatora, za koje su dostupni rezultati oglada zagrevanja izvedeni bez ubrzavanja.

U vrsti „Bez skraćivanja“ u tabeli 2 su prikazane vrednosti za slučaj da se snaga zagrevanja tokom prvog dela oglada održava na konstantnoj vrednosti, jednako ukupnim nominalnim gubicima. Vrsta „Skraćivan“ sadrži vrednosti koje se imaju kada se primeni algoritam i softverski alat opisan u radu.

Iz tabele se može videti da je moguće ostvariti značajno smanjenje trajanja prvog dela oglada, koje dosta varira u zavisnosti od veličine transformatora i konstrukcije sistema za hlađenje. Takođe, uočavaju se i uštede električne energije, koje su manje od skraćivanja oglada zagrevanja, ali i dalje značajne.

Tabela 2. Pregled rezultata

ET	Ogled	Trajanje (h)	Utrošena energija (kWh)
75MVA (ONAF)	Bez skraćivanja	7,25	2892,75
	Skraćivan	5,25	2430,75
Ušteda		27,59%	15,97%
150MVA (ONAF)	Bez skraćivanja	7,25	4770,5
	Skraćivan	6,25	4477,5
Ušteda		13,79%	6,14%
300MVA (OFAF)	Bez skraćivanja	7,75	3906
	Skraćivan	6,25	3457,5
Ušteda		19,35%	11,48%
475MVA (ONAN)	Bez skraćivanja	8,5	4224,5
	Skraćivan	7	3857
Ušteda		17,65%	8,70%
750MVA (ODAF)	Bez skraćivanja	8	14176
	Skraćivan	6	11882,75
Ušteda		25,00%	16,18%

Tabela 3 sadrži zbirne podatke o svih pet oglada. Vidi se da je dužina trajanja prvog dela oglada, primenom algoritma za skraćivanje, smanjena sa 38,75 h na 30,75 h, što je skraćivanje od 20,65%. Kada je u pitanju električna energija u toku ovih pet oglada uštedeno je 3864 kWh, odnosno potrošnja je smanjena za 12,89%, a samim tim smanjen je i trošak za utrošenu električnu energiju.

Tabela 3. Zbirni pregled rezultata

	Standardni ogled	Skraćeni ogled	Ušteda		
Trajanje (h)	38,75	30,75	8	20,65%	
Utrošena energija (MWh)	29,97	26,10	3,86	12,89%	
Cena utrošene energije (€)	1	2154,83	1876,99		277,84
	2	4297,66	3743,53		554,13
	3	4543,41	3957,59		585,82
	4	3572,39	3111,78	460,62	
Cena zauzeća ispitne stanice (€)	7556,25	5996,25	1560	20,65%	

U tabeli 3 dati su i proračuni cene utrošene energije za izvođenje prvog dela oglada zagrevanja, za Srbiju (1), Italiju (2), Nemačku (3) i prosečno za celu Evropu (4), kao i cena zauzeća ispitne stanice. Kako bi se proračunala cena utrošene električne energije uzete su prosečne cene električne energije za industrijske potrošače u drugoj polovini 2018. godine preuzete sa sajta Eurostat [5]. U proračunu su korišćene sledeće vrednosti: Srbija – 0,0719 €/kWh, Italija – 0,1434 €/kWh, Nemačka – 0,1516 €/kWh i Evropa (prosek) – 0,1192

€/kWh. Što se tiče cene zauzeća ispitne stanice, računato je na primeru jedne ispitne stanice u Italiji koja svoje usluge naplaćuje na osnovu broja angažovanih tehničara i vremena potrebnog za obavljanje oglada (65 € po tehničaru i satu, za izvođenje oglada potrebno je tri tehničara).

## 6. ZAKLJUČAK

Međunarodnim IEC standardom [2] se definiše ogled zagrevanja, koji je potrebno sprovesti kao tipsko ispitivanje transformatora. Pored ove obaveze, koja predstavlja proveru kvaliteta transformatora, za koju je prevashodno zainteresovan kupac transformatora, ogled zagrevanja je jedina nedvosmislena metoda provere proračuna i proizvodnog procesa transformatora. Poželjno je da se iz oglada zagrevanja dobiju i dodatne informacije, koje će omogućiti proveru metoda za termički proračun transformatora, što je prevashodni interes proizvođača transformatora.

Motivisano navedenim, razvijen je algoritam i programski alat koji omogućava izračunavanje karakterističnih porasta temperature iz merenja tokom oglada zagrevanja, sprovedenog po proceduri iz važećeg IEC standarda [2]. Program vrši sva potrebna izračunavanja, uključujući i ekstrapolaciju krive hlađenja namotaja u okviru drugog dela oglada zagrevanja.

Imajući u vidu da ogledi zagrevanja traju dugo i zahtevaju značajan utrošak električne energije, program omogućava realizaciju razvijenog algoritma za skraćanje prvog dela oglada zagrevanja uljnih transformatora. Algoritam se bazira na injektiranju promisljive snage gubitaka, tako da je ona na početku prvog dela oglada veća od ukupnih nominalnih gubitaka.

Od primarnog je interesa pratiti temperaturu najtoplije tačke i obezbediti da ona ostane ispod dozvoljenih vrednosti. Zbog toga se u programu stalno izračunava temperatura najtoplije tačke (po postupku iz [3]) i program daje preporuku kada i koliko smanjiti snagu zagrevanja kako bi se temperatura najtoplije tačke održavala u potrebnim bezbednim granicama.

U radu se, pored primarne kontrole da temperatura najtoplije tačke ne prekorači dozvoljenu vrednost, opisuju i ostala podešavanja u algoritmu, kako bi se ogled zagrevanja maksimalno skratio, a zahtevi iz standarda [2] u potpunosti ispunili. Podešavanja su postavljena imajući u vidu zahteve iz [2], ali i brojna ispitivanja tokom testiranja algoritma i programa.

Na sintetičkim signalima za 5 realnih transformatora pokazalo se da algoritam dovodi do prosečnog skraćanja prvog dela oglada zagrevanja za oko 20%, dok je prosečna ušteda u energiji nešto manja od 13%. Imajući u vidu veličinu gubitaka u energetske transformatorima, kao i dužinu trajanja oglada, ostvarivanje ovakvih ušteda u vremenu i energiji je od praktičnog značaja. Ova činjenica, uz dobre dosadašnje rezultate na sintetičkim signalima, kvalifikuju algoritam za testiranje na realnim ogledima zagrevanja.

## LITERATURA

- [1] Radakovic Z, Sorgic M, Wirtschaftliche Betrachtung der thermischen Auslegung von ölgekühlten Leistungstransformatoren, Elektrizitätswirtschaft, Jg 107, Heft 15, 32-38, 2008
- [2] IEC 60076-2, Temperature rise for liquid -immersed transformers, Edition 3.0, 2011-02-23.
- [3] IEC 60076-7, Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers, Edition 2.0, 2018-01-12.
- [4] Rogora D, Nazzari S, Radoman U, Radakovic Z, Experimental research on the characteristics of radiator batteries of oil immersed power transformers, IEEE Trans. on Power Delivery, DOI (identifier) 10.1109/TPWRD.2019.2925451, available on-line <https://ieeexplore.ieee.org/document/8747496/>
- [5] Electricity price statistics for non-household consumers [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity\\_price\\_statistics#Electricity\\_prices\\_for\\_non-household\\_consumers](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_non-household_consumers) (04.08.2019.)

## SUMMARY

### ALGORITHM AND SOFTWARE FOR SHORTENING HEAT RUN TEST OF OIL-IMMERSED POWER TRANSFORMERS

*One of the type tests on power transformers is heat run test, which checks that the characteristic winding and oil temperatures are below allowed values. This is necessary to prevent accelerated ageing and shortening of the transformer life if the temperatures are higher than the allowed values. In addition to the user's clear interest, manufacturers are also interested in the results of heat run tests, as they can verify and improve the accuracy of calculation methods and software [1]. Then they can increase the accuracy and reduce the safety margins of calculation methods, so they can change transformer construction and achieve temperatures that are much closer to the allowed ones. As the result of that, they can reduce material and production costs. The minimal test is defined by the IEC standard [2].*

*Due to the great mass and consequent great thermal capacity of the transformer parts, heat run tests take a very long time. The paper presents an algorithm, and its software implementation, which reduce the occupancy of test station, energy consumption and the total cost of performing heat run tests*

**Key words:** *Heat run test, power transformer, optimization, algorithm, software*