

# Prikaz softvera za termičko projektovanje energetskih uljnih transformatora

Uroš Radoman, Aleksandar Jovanović, Zoran Radaković

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu  
Beograd, Srbija

[radakovic@etf.bg.ac.rs](mailto:radakovic@etf.bg.ac.rs) / Bulevar kralja Aleksandra 73

**Sažetak—** U radu se prikazuje softver čija je osnovna namena termički proračun za specificiranu konstrukciju aktivnog dela unutar suda i spoljašnjeg rashladnog dela uljnog transformatora. Fokus u radu je na strukturi softvera, programskim alatima u kojima je realizovan, kao i specifičnim zahtevima koji se mogu postaviti u slučaju da klijent želi da integriše ovaj specijalizovani softver u okruženje inženjerskih alata koje već poseduje i koje koriste projektanti u fabrikama transformatora za druge neophodne tehničke proračune energetskih transformatora, velikih snaga, struja i napona, a posledično i velikih zapremina i masa.

**Ključne riječi – detaljni termo-hidraulički model, projektovanje energetskih uljnih transformatora, HoST Calculus softver, namenski softver (Detailed Thermal-Hydraulic Model, Oil-Immersed Power Transformer, HoST Calculus Software, Custom Software)**

## I. UVOD

Energetski transformatori su široko rasprostranjeni u elektroenergetskim mrežama i neophodni su za ekonomičan prenos električne energije. To važi kako u klasičnim elektroenergetskim sistemima, tako i u slučaju da se primenjuje prenos energije jednosmernom strujom, kada se transformatori javljaju kao deo postrojenja za transformaciju između sistema naizmenične i jednosmerne struje. Najveći broj transformatora na elektranama, u prenosnom sistemu i sistemu za distribuciju električne energije su izvedeni tako da su aktivni deo (magnetno jezgro i namotaji) potopljeni u sud ispunjen uljem koje služi kao rashladno i izolaciono sredstvo. Orijentaciono, maksimalna snage za koji se u ponudi na tržištu još uvek mogu naći suvi transformatori su 63MVA. Nominalna snaga transformatora u praksi danas prelazi 1000MVA. Čak i u zoni manjih snaga, uljni transformatori su dominantni (na primer trofazni transformatori nominalne snage 630kVA ili 1MVA, 10kV/0.4kV, koji se koriste u distribuciji električne energije).

Kroz namotaje transformatora protiču velike struje, zbog čega se javljaju velike vrednosti gubitaka, kako onih u namotajima, tako i onih koji se mogu javiti usled struja u konstruktivnim delovima i sudu usled velikih vrednosti magnetnog polja (rasutog fluksa). Zbog toga je u fazi projektovanja potrebno odrediti raspodelu magnetnog polja, proceniti njene efekte (dodatne gubitke u namotajima i gubitke u konstruktivnim delovima), kao i druge parametre transformatora koji su predmet specifikacije i ugovora.

Posledica gubitaka je zagrevanje delova transformatora, koje mora biti manje od propisanih granica za primenjene materijale čvrste izolacije (pre svega materijala kojima su izolovani provodnici namotaja) i ulja. Proračun temperatura i projektovanje kanala za hlađenje unutar aktivnog dela i spoljašnjeg rashladnog dela, preko koga se toplota prenosi od ulja ka ambijentu, su deo procesa projektovanja.

Na proračun raspodela magnetnog polja se nadovezuju i mehanički proračuni, odnosno proračuni sila, koje utiču na buku koju stvara transformator, kao i na mehanička naprezanja kojima je podvrgnut transformator pri kratkom spoju.

Konačno, pomenimo i proračune i projektovanje elektroizolacionog sistema, koji, uz ulje, sačinjavaju i izolacija provodnika (osnovna ili dodatna na mestima gde je veća jačina električnog polja zbog ivičnih efekata) i izolacioni delovi (izolacioni cilindri unutar namotaja jednog naponskog nivoa, između namotaja različitih naponskih nivoa, između namotaja i jezgra - prema stubovima i prema jarmu).

Svaki od navedenih proračuna je kompleksan zbog kompleksnih zakonitosti kojima se opisuju magnetne, toplotne i električne pojave.

Prvi transformator je proizведен 1885 godine. Tokom iskustva od preko 130 godina proizvodnje i primene transformatora sakupljeno je ogromno inženjersko iskustvo. Karakteristično za praksu transformatora je da postoji inercija i da se nove metode proračuna i načini projektovanja uvođe pažljivo i dosta sporo, što je i razumljivo imajući u vidu rizik koji bi greška u proračunu i konstrukciji izazvala. Treba imati u vidu i da metoda "pokušaja i grešaka" u ovoj tehnici praktično nemoguća, jer se radi o opremi veoma velikog gabarita, težine, pa prirodno i cene (o tome će se neke informacije dati u narednom odeljku).

Sa druge strane, opšta dostupnost računara i moćni računski resursi koje računari pružaju otvaraju prostor za primenu kompleksnih proračunskih algoritama, koji su zasnovani na bazičnim fizičkim zakonitostima, ali koji zahtevaju rešavanje kompleksnih sistema jednačina, često i nelinearnih. Dakle, da bi se napravio dobar "proračunski i projektantski alat" potrebno je poznavati konstruktivna rešenja, fizičke zakonitosti magnetnih, električnih, toplotnih i mehaničkih pojava, metode rešavanja sistema jednačina i tehnike programiranja.

Svi proizvođači transformatora imaju IT podršku u pomenutom procesu projektovanja, kao i izradi različitih tipova dokumentacije (uključujući i detaljne fabričke crteže). Ukoliko se takvim kompanijama nudi specijalizovani softver za neki od navedenih proračuna, pogodnija opcija za proizvođača transformatora je da se takav softver integriše u ostale softverske alate. Kada se takav softver nudi, po pravilu ponuđač treba da ponudi dve opcije - da softver bude "stand alone" ili da se integriše u okruženje postojećih alata.

U radu se opisuje razvijeni softver za termičke proračune HoST Calculus [1]. O samim algoritmima koji se koriste u softveru je bilo reči u našim prethodnim radovima [2] - [5], a ovde će se govoriti o potencijalu za uštедe koje se mogu postići softverom i praktičnoj realizaciji softvera.

## II. POTENCIJAL ZA UŠTEDU BAZIRAN NA PRECIZNIM TERMIČKIM PRORAČUNIMA

Ilustracije radi, na Sl. 1 su prikazani transformatori različitih snaga: od distributivnog (tipična snaga 1000 kVA), preko prenosnog (tipična snaga 31.5MVA), do velikih transformatora - snaga 112MVA, 15.65kV/242kV i snaga 725MVA, 21kV/400kV.



a) distributivni transformatori



b) transformator iz prenosnog sistema



v) blok transformator snage 112 MVA



g) blok transformator snage 725 MVA

Slika 1. Izgled transformatora različitih snaga i namene

Cene transformatora (po MVA nominalne snage) značajno variraju u zavisnosti od snage, naponskog nivoa, tehnologije i namene. Na bazi pregleda dokumenata dostupnih na internetu [6] - [10], kao i podataka sa kojima smo se susretali u privredi – cene transformatora (bez opreme i instalacionih troškova) se kreću oko 10000 €/MVA i variraju u širokom opsegu, u zavisnosti od pomenutih faktora.

Zbog specifičnosti u industriji proizvodnje transformatora izloženih u prethodnom odeljku, i dalje su u masovnoj primeni metode koje su dominantno zasnovane na iskustvu (empirijske formule), a ne na fizici procesa i njihovom matematičkom modelu. Dobra strana takvih "klasičnih metoda" je što su robusne i jednostavne (moguća je njihova realna primena i bez upotrebe računara i namenskih programa), a loše strane su što se ne mogu primeniti na slučajevе koji odstupaju od sličnih slučajeva koji su postojali u prethodnoj praksi, kao i to što im je tačnost ograničena. Zbog ograničene tačnosti projektanti obično uvode sigurnosne faktore, odnosno transformator projektuju tako da vrednosti porasta temperaturne koje su specificirane u ugovoru ili u relevantnim standardima umanjuju za određen iznos koji zatim koriste kao granične vrednosti ispod kojih treba da budu izračunati porasti temperaturna. Krajnji rezultat je da su transformatori predimenzionisani,

odnosno da je stvarna snaga transformatora, pri kojoj je jedan od tri karakteristična porasta temperature (najtoplja tačka namotaja, srednja temperatura namotaja i najviša temperatura ulja) jednak dozvoljenoj vrednosti, dok su preostala dva porasta manja ili jednaka od dozvoljenih vrednosti.

U [11] je prikazan rezultat obrade velikog broja ogleda zagrevanja velikih transformatora (146 ogleda) dobijeno je da srednja vrednost faktora predimenzionisanja transformatora iznosi 10.74%. Pod pretpostavkom da se unapređenjem metoda za proračun temperatura može postići tačnost od 5 K za namotaj i 3 K za ulje, odnosno da se pri projektovanju mogu koristiti sigurnosne margine od 5 K i 3 K, faktor predimenzionisanja se može smanjiti na 2.53 %. Time bi se profit kompanije mogao povećati približno za približno 8.2 %, što je prema cenama na tržištu 2008 godine (6300 Eura po MVA nominalne snage transformatora) za fabriku čije je godišnja proizvodnja 10 GVA, suma od 5.2 miliona evra.

Procena tačnosti od 5K za namotaj i 3K za ulje se pokazala kao realna - softver HoST Calculus se koristi u projektantskoj praksi u dve velike kompanije, pri čemu je okončan jednogodišnji "garantni period" u obe kompanije, u toku koga je postojala ugovorna obaveza otklanjanja svih bug-ova i intervencija u kodu za slučajevе za koje se ustanovi da postoje značajna odstupanja u odnosu na vrednosti temperaturu izmerene u ispitnoj stanici u ogledu zagrevanja. Softver i sama metoda su podvrgnute opsežnim testovima, pri čemu je samo jedan od dva pomenuta korisnika softvera HoST Calculus, u cilju testiranja u toku godinu dana, izvršio proračune i provere na preko 50 transformatora koje je do sada proizveo i ispitao.

### III. REALIZACIJA SOFTVERA HOST CALCULUS

HoST Calculus softver je prvo bitno realizovan u programskom jeziku MATLAB. Međutim, po želji prvog klijenta (kako bi se omogućilo povezivanje sa postojećom bazom podataka i inženjerskim alatima), kôd je kompletno preveden u C#. Grafički interfejs (ulazni i izlazni GUI), koji je kasnije razvijen i softver na taj način zaokružen, realizovan je u C# i WPF (Windows Presentation Foundation). U skladu sa dosadašnjim potrebama, HoST Calculus radi isključivo u Windows okruženju.

### IV. PRIKAZ ULAZNOG I IZLAZNOG GUI-A

Na Sl. 2 dati su detalji iz ulaznog GUI-a. Specifičnost u industriji proizvodnje transformatora je da postoje predefinisana rešenja za pojedine delove konstrukcije, zbog čega je bilo potrebno da se pojedini delovi, kao što je presek magnetnog (Sl. 2 b) ili izolacioni sistem između namotaja i jarma magnetnog kola, mogu sačuvati i učitati. To je realizovano korišćenjem fajlova u XML formatu. Pored toga, formirane su i baze podataka sa opremom koja se kupuje od proizvođača (pumpi, ventilatora, hladnjaka, radijatora), kao i karakteristikama ulja.

Na Sl. 3 je prikazan grafik konvergencije, koji se prati tokom izvršenja programa.

Izlazni GUI (Sl. 4) praktično daje dva nivoa informacija – globalne rezultate i detaljne rezultate. Globalni (organizovani u tabelarnoj formi i formi globalne hidrauličke šeme) pokazuju

najvažnije parametre poput protoka ulja, temperatura gornjeg ulja, srednje temperature namotaja, temperature vruće tačke itd. (koje je moguće uporediti sa rezultatima merenja). Drugi nivo predstavlja detalje koji su od koristi, pre svega, projektantima. Ti podaci, poput detaljne raspodele temperature namotaja, raspodele protoka ulja po različitim baterijama radijatora, padovi pritisaka u izolacionim sistemima i tome slično – mogu da ukazuju na mesta koja je potrebno korigovati kako bi se poboljšalo hlađenje transformatora, odnosno smanjile temperature.

Za potrebe interne dokumentacije i prezentacije, omogućen je export rezultata i podataka u različitim formatima (kako grafičkim, tako i tekstualnim i u formi tabela).

### V. UKLAPANJE U POSTOJEĆE PROJEKTANTSKE ALATE U KOMPANIJI

Softver se sastoji iz tri zasebne celine: ulaznog GUI-a, glavnog dela programa (core software, koji sadrži matematičke modele zasnovane na rešavanju termičko-hidrauličke mreže), i izlaznog GUI-a. Deo softvera za proračune (core software) učitava podatke iz XML fajla koji se formira u delu softvera za ulazni GUI. Značajan posao je bila kontrola ulaznih podataka, kako elementarna kontrola polja na jednoj strani, tako završna kompleksna kontrola (ona se odnosi na kontrolu nad skupovima podataka unetim na različitim stranicama) koja se vrši po završetku kompletног unosa, a pre pokretanja proračunskih metoda.

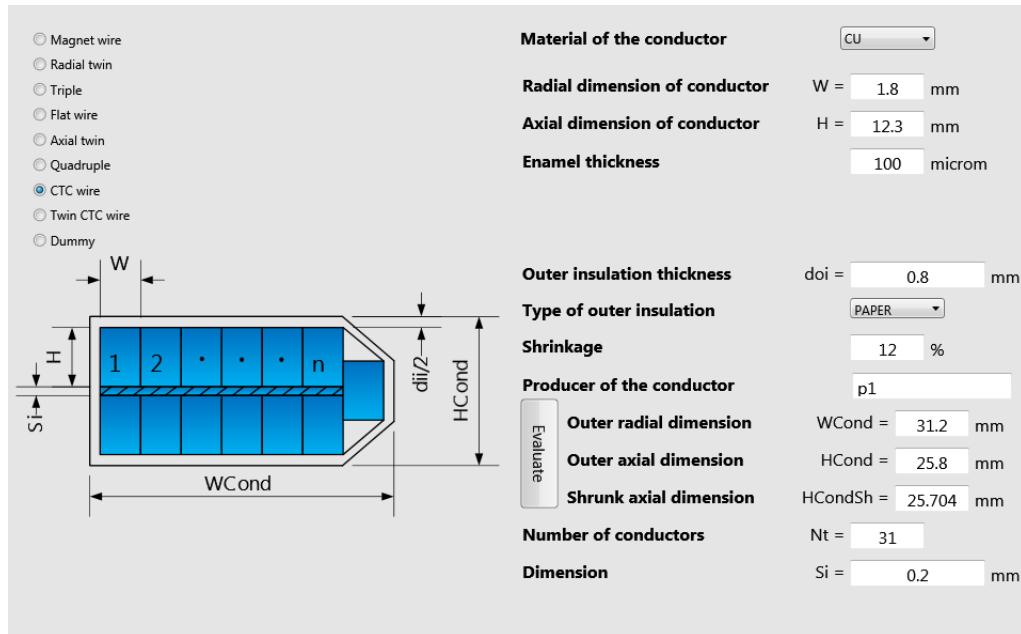
Uklapanje sa postojećim projektantskim alatima, kao što je i urađeno u jednoj od kompanija koje koriste deo HoST Calculus softvera za proračune i izlazni GUI, je da se XML fajl, koji ima definisani formu, generiše iz baze sa podacima o transformatoru koja postoji u informacionom sistemu proizvođača transformatora (dakle ne iz ulaznog GUI-a, kao što se radi u stand-alone verziji). U konkretnom slučaju, u već postojećem ulaznom GUI-u integralnog softvera (koji je obuhvatao više projektantskih alata) u kome se zadaju podaci potrebni za bilo koji od proračuna tokom projektovanja je dodat novi tab, sa podacima koji su od interesa samo za termičke proračune, pa kao takvi nisu bili obuhvaćeni u ostalim tab-ovima. Zatim su programeri u kompaniji izvršili mapiranje, odnosno generisanje XML fajla definisane forme. Osnovni razlozi za uklapanje u postojeće projektantske alate je što se izbegava da se dva puta unose isti podaci, što nije dobro zbog utrošenog vremena, ali i mogućnosti greške. Drugi razlog je što su projektanti navikli na jedan tip GUI-a, pa je zgodno postojeći GUI proširiti dodatnim tab-om, čija je forma slična formi ostalih. Ova opcija je od interesa pre svega za velike kompanije, koje imaju jaku softversku projektantsku podršku.

Prednost opcije da se HoST Calculus koristi u njegovoj kompletnoj formi je što je to što se radi o "stand alone" formi, standardnom obliku softvera sa zaštitom hardverskim ključem [12], čije korišćenje može da započne odmah, bez ikakvih kašnjenja i dorada. Integracija sa drugim projektantskim alatima može da se uradi i naknadno, bilo da to rade programeri u kompaniji ili da to uradi HoST Calculus tim, polazeći od baze podataka sa podacima o transformatoru koja postoji u okviru softvera sa projektantskim alatima u kompaniji.

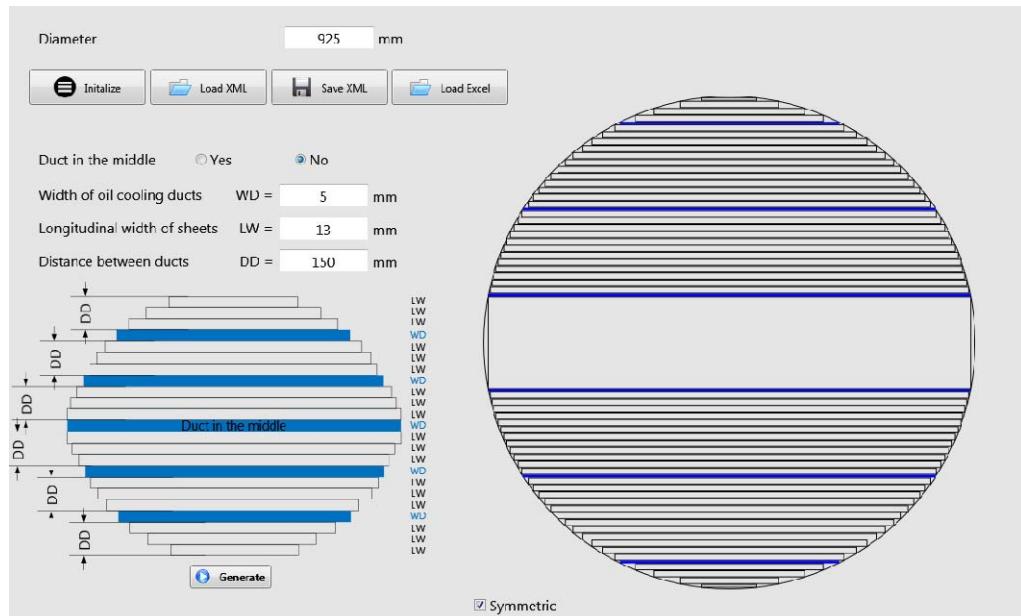
Što se tiče izlaznog GUI-a, on učitava xml fajl sa rezultatima, koji se formira po završetku izvršenja softvera za proračune. Iako je moguće da kompanije prave svoj izlazni GUI, to nije realna opcija. U praksi je moguće da korisnik želi neku specifičnu formu prikaza rezultata ili izveštaja (realno je da se to odnosi na tabelarni prikaz globalnih parametra, a ne detaljni grafički prikaz rezultata), što spada u domen manjih dorada HoST Calculus softvera.

Konačno, pomenimo i opciju koja je primenjena u slučaju nekoliko konsultantskih usluga, da se korisniku ustupi ulazni i izlazni GUI. Korisnik u ulazni GUI unosi podatke o

konstrukciji transformatora i po završetku unosa generiše standardizovani xml fajl, koji se učitava u deo HoST Calculus softvera za proračune, proračuni se izvrše i korisniku pošalje xml fajl sa rezultatima, koji on učitava u izlazni GUI. Razmišljalo se i o drugim opcijama korišćenja HoST Calculus softvera (preko WEB-a), ali se od njih, bar u ovom trenutku, odustalo imajući u vidu broj korisnika, broj proračuna koji se vrši i obučenost korisnika, odnosno njihovo poznavanje programa i potrebnih podataka koje treba uneti. Opcija da HoST Calculus učitava podatke omogućava kontrolu njihove korektnosti i sprečavanje posledica koje mogu nastati kao posledica pogrešnih podataka.

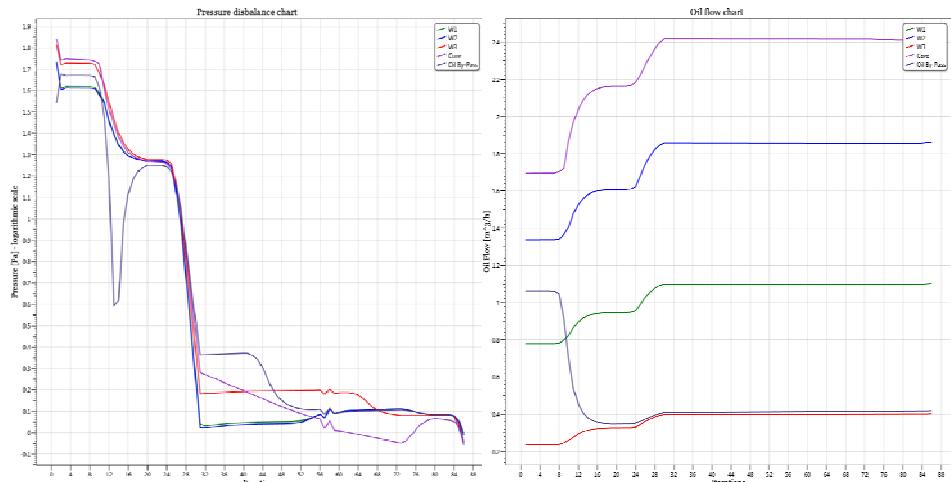


(a) Primer provodnika

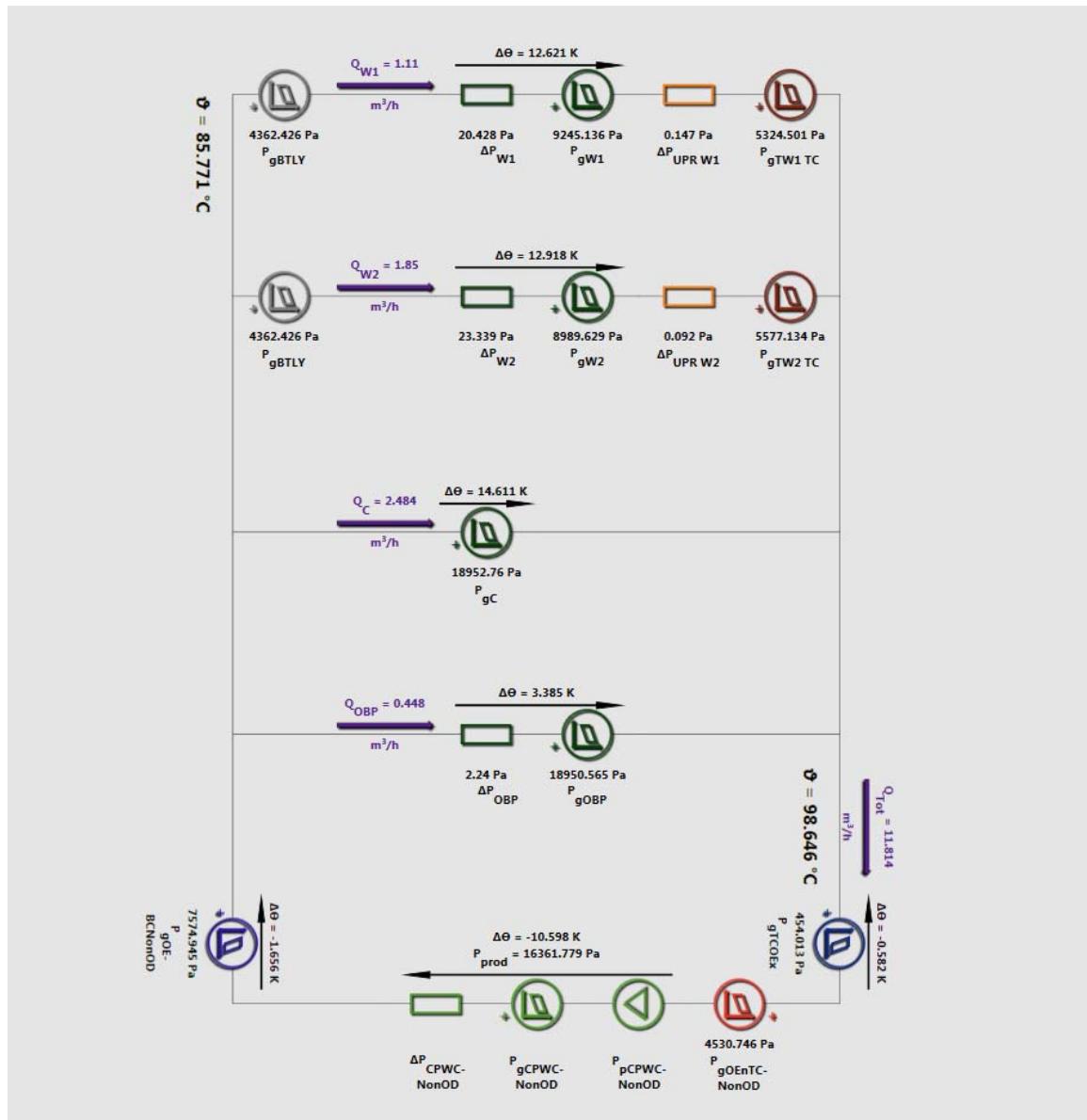


(b) Primer magnetnog jezgra

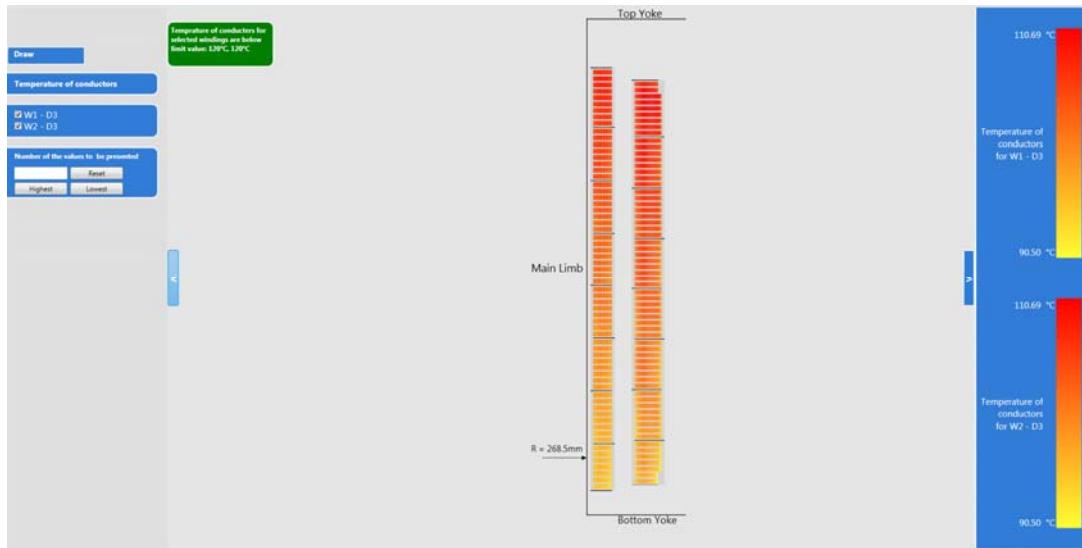
Slika 2. Detalji ulaznog GUI



Slika 3. Grafik konvergencije (levo - disbalans pritisaka po granama hidrauličke šeme; desno – protok ulja po granama hidrauličke šeme)



(a) Globalna raspodela protoka, pritisaka i temperaturna ulja



(b) Raspodela temperature u provodnicima namotaja

Slika 4. Elementi izlaznog GUI

## VI. ZAKLJUČAK

U radu su date osnovne informacije o specijalizovanom softveru za termičke proračune energetskih uljnih transformatora. Osnovna namena softvera je u projektovanju transformatora, kako bi se ostvarilo da temperature budu ispod dozvoljenih graničnih vrednosti, ali ne mnogo ispod njih jer to nedvosmisleno ukazuje da je transformator mogao da bude lakši i jeftiniji, a time i zarada proizvođača veća. Proračunska metoda je takva da praktično predstavlja termički simulator transformatora - primera radi, rezultat proračuna za gubitke kao u ogledu zagrevanja omogućava predviđanje temperaturu koje se mere u ogledu zagrevanja, što omogućava i proveru tačnosti proračunske metode. Rad prikazuje strukturu softvera, način njegove realizacije i opcije koje su od interesa u inženjerskoj praksi transformatora, pre svega fabrikama za proizvodnju transformatora.

## LITERATURA

- [1] <https://www.hostcalculus.com>
- [2] Radakovic, Z., Sorgic, 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.
- [3] M. Sorgic, Z. Radakovic. (2010): "Oil-Forced Versus Oil-Directed Cooling of Power Transformers," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, 2590-2598.
- [4] Radakovic, Z., Sorgic, M., Van der Veken, W., Claessens, G. (2012): Ratings of Oil Power Transformer in different Cooling Modes, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, 618-625.
- [5] Radakovic, Z., Radoman, U., Kostić, P. (2015): Decomposition of the Hot-Spot Factor, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 30, No. 1, 403-411.
- [6] [http://www.focus-lab.it/wp-content/uploads/2016/04/ecodesign\\_study\\_lot2\\_transformers\\_2011.pdf](http://www.focus-lab.it/wp-content/uploads/2016/04/ecodesign_study_lot2_transformers_2011.pdf)

- [7] [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology\\_data\\_for\\_energy\\_transport.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_for_energy_transport.pdf)
- [8] [https://www.wecc.biz/Reliability/1210\\_BV\\_WECC\\_TransCostReport\\_Final.pdf](https://www.wecc.biz/Reliability/1210_BV_WECC_TransCostReport_Final.pdf)
- [9] <https://www.udligning.dk/UdligningDocuments/Documents/Udligningsmodel%2020171101.pdf>
- [10] [http://www.acer.europa.eu/Official\\_documents/Publications/UIC\\_Electricity\\_History/UIC%20report%20%20-%20Electricity%20Infrastructure%20corrected.pdf](http://www.acer.europa.eu/Official_documents/Publications/UIC_Electricity_History/UIC%20report%20%20-%20Electricity%20Infrastructure%20corrected.pdf)
- [11] Radakovic, Z., Sorgic, M. (2008): Wirtschaftliche Betrachtung der thermischen Auslegung von ölkühlten Leistungstransformatoren, Elektrizitätswirtschaft, Jg 107, Heft 15, 32-38
- [12] <https://www.wibu.com/codemeter.html>

## ABSTRACT

This paper presents the software for the thermal calculations of the specified construction of active part and outer cooling system of the oil-immersed transformers. The focus of the paper is on presenting the software structure, tools used, and specific requests in case when user demands including of this specialized software into its design software tools used by designers in the transformer factories for other calculations necessary to be done in design process of these devices operating at high power, voltage and current (hence having the large dimensions and mass).

## PRESENTATION OF THE SOFTWARE FOR THE THERMAL DESIGN OF THE OIL-IMMERSED POWER TRANSFORMERS

Uros Radoman, Aleksandar Jovanovic, Zoran Radakovic