

## **PMOT i PMODV APLIKACIJE ZA ODREĐIVANJE DOZVOLJENOG OPTEREĆENJA TRANSFORMATORA I DALEKOVODA DISTRIBUTIVNIH MREŽA**

\*S. Krstonijević, Institut "Mihajlo Pupin", Srbija  
N. Čukalevski, Institut "Mihajlo Pupin", Srbija  
G. Jakupović, Institut "Mihajlo Pupin", Srbija  
Suzana Cvetičanin, Institut "Mihajlo Pupin", Srbija  
Nada Damjanović, Institut "Mihajlo Pupin", Srbija

### **KRATAK SADRŽAJ**

Uslovi liberalizovanog tržišta električne energije zahtevaju brži i kvalitetan pristup informacijama, neophodnim u planiranju i odlučivanju na različitim hijerarhijskim nivoima u elektroprivredi. To se posebno odnosi na operativno-tehničko-energetske informacije u EES. Posledični porast kompleksnosti, kako tehničkog, tako i komercijalnog aspekta eksploatacije EES-a, utiče na potrebu za pažljivijom i efikasnijom korišćenje opreme, kao što su transformatori i dalekovodi, kako bi se zaštitile velike investicije. Stoga se danas na tržištu nalazi značajan broj, tipično IT-baziranih proizvoda, vodećih svetskih kompanija koji omogućavaju monitoring stanja postojeće opreme, pre svega sa ciljem povećanja propusne moći elemenata mreže.

U okviru modernizacije Regionalnih dispečerskih centara upravljanja (RDC) EMS-a realizovane su, a potom, i implementirane aplikacije za povećanje propusne moći elemenata i to za *proračun mogućnosti opterećenja transformatora (PMOT)* i *proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda (PMODV)*. Ove aplikacije služe proceni mogućeg opterećivanja transformatora, odnosno, dalekovoda, na bazi tekućih i prognoziranih vrednosti opterećenja i uslova ambijenta, poštujući zadata i postojeća ograničenja. Proračun se zasniva na aktuelnim i istorijskim podacima, prikupljenim sa SCADA sistema i iz baze istorijskih podataka. Numerička osnova ovih aplikacija su savremeni termički modeli transformatora i dalekovoda, koji su široko prihvaćeni standardi, verifikovani u praksi. Sistem je IT-podržan, baziran na klijent-server arhitekturi i *open-source* rešenjima, opisanim u radu. Konačno, primena ovih aplikacija je ilustrovan u radu kroz nekoliko realnih primera.

**Ključne reči:** transformatori, dalekovodi, dozvoljeno opterećenje, informacione tehnologije, matematički modeli

### **1. UVOD**

Savremeni pristup u eksploataciji transformatora i dalekovoda, diktiran novim trendovima u EE sektoru, se kreće ka maksimalnoj iskorišćenosti njihovih kapaciteta. To, generalno, podrazumeva pomeranja eksploatacije ka granicama ( a nekad i preko njih) nominalnog opterećivanja. Kako ovakve okolnosti, podrazumevaju rizik od oštećenja i prevremenog starenja osnovnih elemenata EE sistema, to su od velikog značaja metode i načini njihove zaštite u režimima rada na i preko granica nominalnog opterećivanja. Da bi se optimizirala iskorišćenost resursa, bez skraćivanja projektovanog

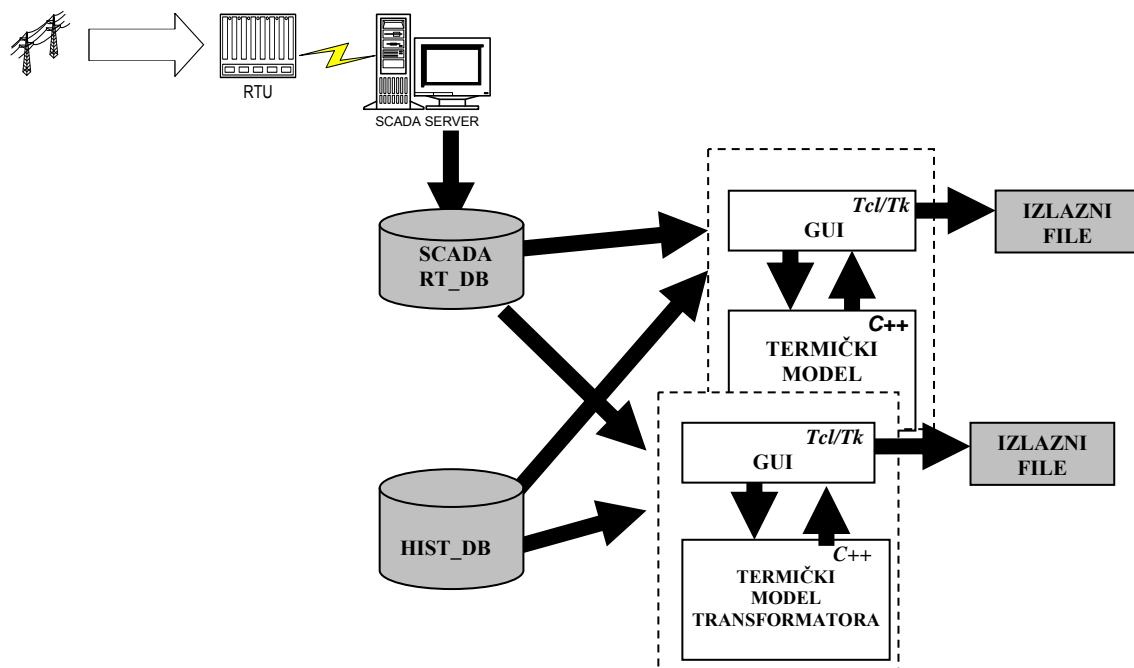
\*[sovjetka@automatika.imp.bg.ac.yu](mailto:sovjetka@automatika.imp.bg.ac.yu)

radnog veka, potrebno je omogućiti kontrolu ovih režima rada, kroz *real-time* pristup stanju EE elemenata, zarad dinamičke procene njihove opteretivosti. Praktično, ova funkcionalnost se, najčešće, realizuje kroz *monitoring* transformatora ili dalekovoda u okviru supervizije celokupnog EE sistema, za šta su primeri *Alstom*-ov MS2000 (1) i *EPRI*-jev DTCR (2) nadzorni sistem. Ova rešenja se, mahom, oslanjaju na raznovrsne savremene IT koncepte, čime obezbeđuju blagovremenost i kompletnost praćenja rada EE elemenata. S druge strane, nadzor EE sistema je zasnovan na aktuelnim izmerenim vrednostima, što doprinosi stalnom razvoju senzora, kao i senzorskih setova za optimalano praćenje njegovih elemenata (3), (4), (5), (6).

Prateći neminovne savremena trendove, Institut Mihajlo Pupin je, u okviru projekta *Baza istorijskih podataka* (BIP) i *elektroenergetske* (EE) *aplikacije*, razvio, realizovao i implementirao i aplikacije za *proračun mogućnosti opterećenja transformatora* (PMOT) i *proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda* (PMDV). Koristeći se standardnim termičkim modelima transformatora i dalekovoda, aktuelnim i istorijskim podacima sa SCADA-e i baze istorijskih podataka, ove aplikacije vrše proračun mogućeg opterećenja i preopterećenja, za naredni period, poštujući konstrukciona i zadata ograničenja. Uz fleksibilan *friendly* korisnički *interface*, omogućavajući više načina rada za različite konkretne uslove terećenja, PMOT i PMDV aplikacije nude koristan alat za pomoć u odlučivanju na različitim nivoima eksploatacije transformatora i dalekovoda.

## 2. PMOT i PMDV aplikacija

Relativno visoka cena transformatora i visokonaponskih vodova zahteva pažljivo korišćenje njihovih resursa u pravcu povećanja propusnog kapaciteta i ostvarivanja ušteta. Prilagođavajući se uslovima rada u režimima preopterećenja, jedan od osnovnih problema pri eksploataciji transformatora i dalekovoda je mogućnost procene njihove opeteretivosti, zavisno od konkretnih uslova i ograničenja. Generalno, opteretivost prenosno/distributivnih elemenata, zavisi od prisutnih konstrukcionih i eksploatacionih ograničenja i uslova ambijenta. Prekoračenje ovih ograničenje kod transformatora dovodi do promena izolacionih karakteristika i trajnog oštećenja izolacije namotaja i ulja, što, kao posledicu ima skraćenje projektovanog radnog veka transformatora i ,potencijalno, oštećenja. (Po analizama rada postojećih jedinica, prosečni vek transformatora kod kojeg je u toku jedne decenije došlo do oštećenja izolacije je 17.8 godina, dok je, po standardu, projektovani radni vek 20.6 godina (7).) Analogno, osnovni problem preopterećenja dalekovoda je topljenje zaštitne masti užeta, što dovodi do ubrzanog starenja dalekovoda.



Slika 1: Generalna arhitektura aplikacija u okviru sistema BIP i EE

Imajući na umu složenost proračuna za dobijanje vrednosti kritičnih veličina za praćenje termičkog stanja transformatora i dalekovoda, procena njihove opteretivosti zahteva automatizovan pristup. Osnovna ideja PMOT i PMODV aplikacija je da se na osnovu merenja sa postojeće SCADA-e, prognoziranih vrednosti opterećenja i uslova ambijenta za odabrani, budući vremenski interval, vrši proračun dozvoljenog opterećenja transformatora i dalekovoda na posmatranom intervalu.

PMOT i PMODV aplikacije se sastoje iz četiri osnovne komponente (videti sliku 1):

- Numeričko jezgro aplikacije, zasnovanog na odgovarajućim termičkim modelima
- Konekcija sa SCADA *real-time* bazom podataka (RT\_DB)
- Konekcija sa bazom istorijskih podataka (*Historical Database*, HIST\_DB)
- Dvosmerni korisnički *interface* (*Graphical User Interface*, GUI)

Merene vrednosti, potrebne za proračun, su, telemetrijom, lokalno prikupljene u daljinskim stanicama (*Remote Terminal Units*, RTU). Putem komunikacijskog kanala se ovi podaci prikupljaju u centralne stanice, gde ih SCADA server smešta u *real-time* bazu podataka (RT\_DB). PMOT i PMODV aplikacije ove podatke prikupljaju pristupanjem bazi podataka, zadržavajući potpunu nezavisnost od ostatka sistema. Parametre modela aplikacija prikuplja iz istorijske baze podataka, ali je omogućen i direkatan pristup od strane korisnika. Za unos pretpostavljenih i prognoziranih vrednosti, kao i za prikaz i grafičku vizuelizaciju rezultata, koristi se fleksibilni korisnički *interface*. Svakim pokretanjem aplikacije se generiše ASCII izlazna datoteka, sa svim rezultatima proračuna. Proračuni su zasnovani na savremenim, u praksi, verifikovanim termičkim modelima transformatora i dalekovoda. Aplikacije su realizovane na *Linux* platformi, minimalno, *Red Hat 5.2* verzija. Termički model je implementiran u C++, dok je za realizaciju *interface*-a korišćen *Tcl/Tk*.

## 2.1 PMOT aplikacija

Za praćenje termičkog stanja transformatora relevantne su dve veličine: temperatura najtoplije tačke namotaja, tzv. *hot-spot* temperatura i temperatura ulja na vrhu suda, tzv. *top-oil* temperatura. Po usvojenom IEC 60354 termičkom modelu (8), implementiranom u PMOT aplikaciji, vrednosti ovih veličina linearno rastu počev od dna do vrha namotaja, sa konstantnom temperaturnom razlikom. Zakonitost kojom se ove promene mogu opisati su modeli prvog reda porasta *top-oil* (odnosno *hot-spot*) temperature u odnosu na temperaturu ambijenta, za step funkciju strujnog opterećenja. Takođe, pomenuti IEC standard nudi i empirijski obrazac za proračun starenja transformatora.

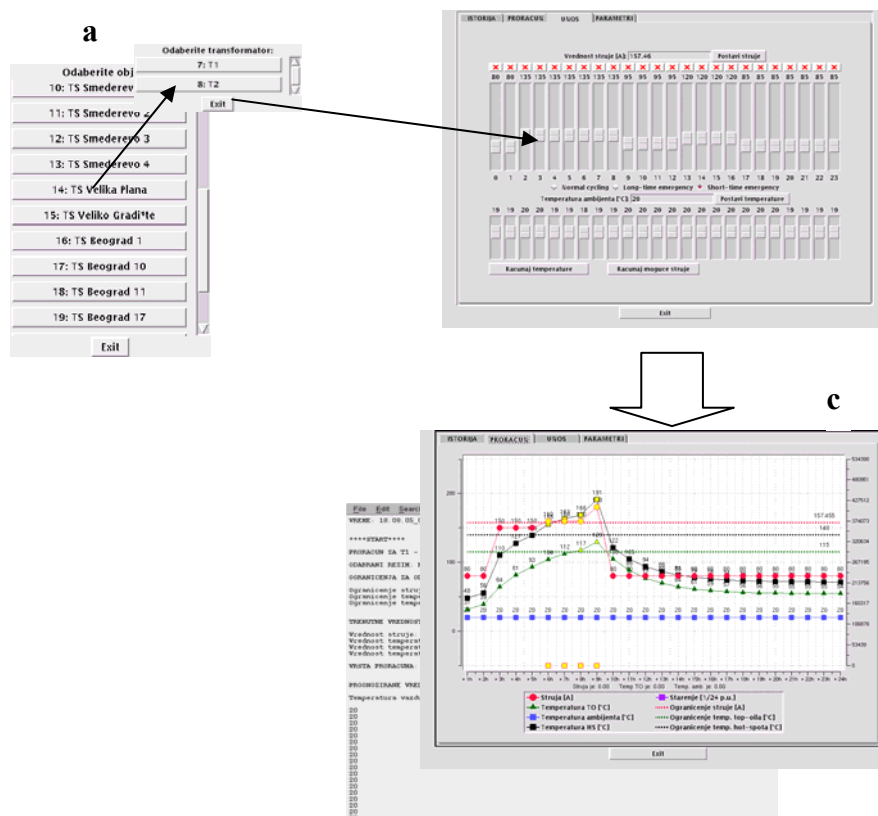
## 2.2 Korišćenje PMOT aplikacije

Podaci sa SCADA-e, koji su potrebni PMOT aplikaciji za proračun su aktuelne vrednosti *top-oil* temperature i strujno opterećenje transformatora, kao i temperatura ambijenta. Putem *interface*-a je omogućeno selektovanje objekta, potom i transformatora iz baze istorijskih podataka, za koji se želi vršiti proračun, čime se inicira prikupljanje vrednosti parametara odabranog transformatora i, konačno, njihov pregled, (slika 2a). Na dalje je omogućen unos prognoziranih vrednosti temperatura ambijenta i strujnog opterećenja za naredni period (do, maksimalno, 24 sata), (slika 2b). Koristeći aktuelne i prognozirane vrednosti, kao argumente usvojnog termičkog modela transformatora, vrši se proračun mogućeg opterećenja za naredni vremenski period i rezultati se plasiraju na *interface*-u i, kao trajniji dokument, u izlaznoj datoteci, (slika 2c).

Konkretno, PMOT aplikacija omogućava proračun:

- *Top-oil* temperature transformatora za naredne sate (do, maksimalno, 24h), na osnovu aktuelnih i prognoziranih vrednosti temperature ambijenta i struje opterećenja
- Moguće strujno opterećenje transformatora za naredne sate, na osnovu aktuelne vrednosti temperature ulja i struje opterećenja i aktuelne i prognoziranih vrednosti temperature ambijenta, poštujući ograničenja relevantnih veličina po standardu
- Starenje transformatora za aktuelne uslove opterećenja

b



Slika 2: Interface navigacija kod PMOT aplikacije

## 2.3 PMODV aplikacija

Numerički indikator termičkog stanja visokonaponskih vodova je temperatura provodnika dalekovoda. Po usvojenom termičkom modelu vodova (9), (10), brzina promene temperature provodnika je određena balansom između faktora koji zagrevaju i onih koji hlade provodnik dalekovod (jednačina 1)

$$mc_p \frac{d\theta}{dt} = P_j + P_s - P_r - P_c \quad (1)$$

gde je  $P_j$  Joule-ovi gubici u provodniku,  $P_s$  zagrevanje provodnika usled sunčevog zračenja,  $P_r$  hlađenje provodnika konvekcijom i  $P_c$  hlađenje provodnika zračenjem. Konkretnije, brzina promene temperature provodnika zavisi od strujnog opterećenja dalekovoda, električnih karakteristika provodnika i atmosferskih uslova (sunce, vetar, temperatura ambijenta). Matematički, model se sastoji iz pet nelinearnih parametara i proračun je realizovan metodom numeričkog integraljenja. Kako se temperatura provodnika ne meri, to se njena početna vrednost procenjuje, na osnovu podataka iz poslednja tri sata. Po pomenutom modelu, zagrevanje dalekovoda u velikoj meri zavisi od meteoroloških uslova, koji su, tipično, promenljivi duž jednog dalekovoda. Stoga su dalekovodi izdvojeni na deonice, za koje se vrednosti temperature ambijenta, brzine i napadnog ugla vetra mogu smatrati konstantnim. Posledično, opteretivost različitih deonice istog dalekovoda nije ista, u kom smislu je, za svaki dalekovod, definisana tzv. kritična deonica.

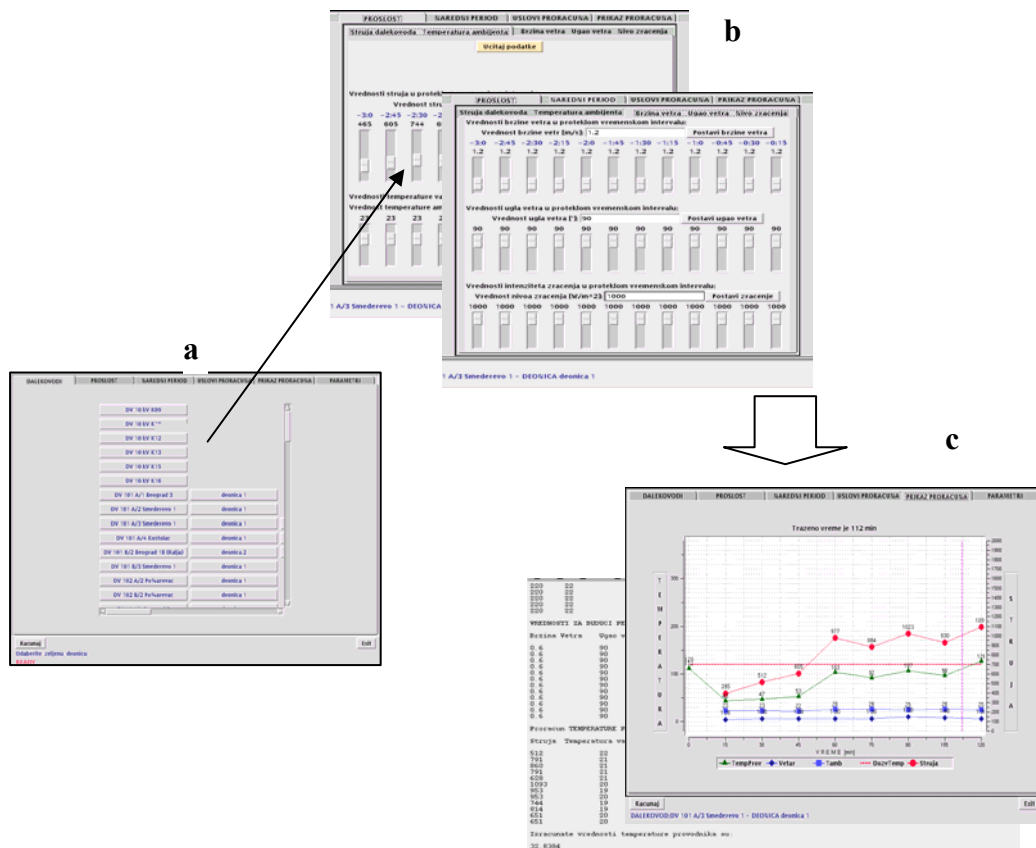
## 2.4 Korišćenje PMODV aplikacije

Prevažhodno, korisnički interface PMODV aplikacije omogućava izbor dalekovoda, potom odgovarajuće deonice, kao i njihov pregled (slika 3a). Izborom odgovarajuće deonice se inicira komunikacija sa konfiguracionom datotekom, iz koje se preuzimaju potrebni parametri za odabranu

deonicu. Kao i kod PMOT aplikacije, PMODV je konektovan na SCADA sistem, sa kojeg aplikacija preuzima vrednosti struje opterećenja i temperature ambijenta za protekla tri sata. Ostale vrednosti neophodne za proračun početne vrednosti temperature provodnika (vrednost brzine i napadnog ugla vetra, nivo intenziteta sunčevog zračenja), za pomenuti vremenski period, se ručno unose putem korisničkog *interface*-a (slika 3b). Prognozirane vrednosti meteoroloških parametara i struje opterećenja za naredna tri sata se unose na isti način. Prikupljeni i uneti podaci se koriste kao argumenti za proračun mogućnosti opterećenja u naredna tri sata, a rezultati se plasiraju, grafički, putem *interface*-a i kao trajni zapis, u izlaznoj datoteci (slika 3c).

PMODV aplikacija omogućava tri osnovna tipa proračuna:

- Temperature provodnika dalekovoda za naredni period (do max. 3h, sa rezolucijom od 15min.), na bazi aktuelnih i prognoziranih vrednosti opterećenja dalekovoda i uslova ambijenta
- Dozvoljeno strujno opterećenje dalekovoda, respektujući temperaturno ograničenje, za zadati vremenski period (max. 3h), na bazi aktuelnih i prognoziranih vrednosti uslova ambijenta
- Vremenski interval za koji se dostiže zadata vrednost temperature provodnika, a na bazi aktuelnih i prognoziranih vrednosti uslova ambijenta



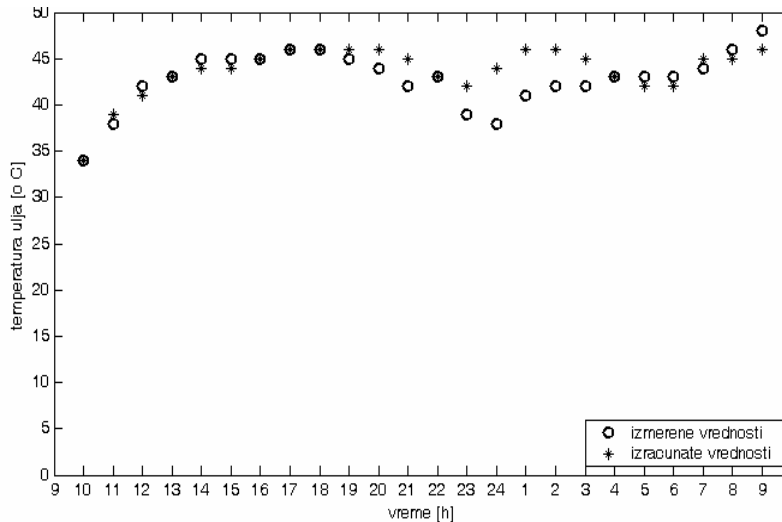
Slika 3: *Interface* navigacija kod PMODV aplikacije

### 3. Primeri praktične primene

PMOT i PMODV aplikacije su implementirane, testirane i u praktičnoj su primeni u RDC Beograd, dok je PMOT aplikacija, od skora, i u nekoliko drugih RDC-ova u Srbiji. Radi ilustracije rada i korisnosti aplikacija, izdvojeni su konkretni primeri rezultata praktične primene i testiranja aplikacija.

### 3.1 Isključenje transformatora T1 u TS 110/35 kV Beograd 1

U TS 110/35 kV Beograd 1 je zbog sušenja ulja, u periodu od 08.11.2004. u 08:34 h, do 07.12.2004. u 11:30 h bio isključen transformator T1. Isključenjem ovog transformatora ceo teret je preuzeo transformator T2. Merene vrednosti struje opterećenja i temperature ulja za period od 24 sata nakon ispadanja transformatora T1 iz pogona su preuzete iz SCADA arhive, sa korakom od 15 minuta.



Slika 4: Paralelni prikaz izračunatih i izmerenih vrednosti temperature ulja za transformator T1 u TS 110/35 kV Beograd 1

Kao ulazne podatke u proračunu su korištene srednje satne vrednosti. U Tabeli 1 je dat prikaz ovih vrednosti, sa korakom od po 3 h.

TABELA 1 - Uzorak srednjih satnih vrednosti struje i temperature ulja transformatora T2 u TS 110/35 kV Beograd 1

Datum/vreme	Opterećenje tr. T2 sa strane 110 kV (A)	Temperatura ulja (°C)	Prosečna temperatura ambijenta u Beogradu (°C)
08.11.04/09:00	131	34	4.5
08.11.04/12:00	133	43	
08.11.04/15:00	131	45	
08.11.04/18:00	133	45	
08.11.04/21:00	118	43	
08.11.04/24:00	141	41	
09.11.04/03:00	110	43	6
09.11.04/06:00	139	44	
09.11.04/08:00	131	48	

Za trenutne vrednosti ulaznih podataka su uzete vrednosti sa početka posmatranog intervala, dok su, na dalje, vrednosti struje transformatora i temperature ambijenta unesene u aplikaciju kao prognozirane vrednosti. Paralelan prikaz izmerenih vrednosti i onih dobijenih na izlazu PMOT aplikacije, je prikazan slikom 4.

### 3.2 Testiranje PMODV aplikacije

Neposredno pre implementacije, funkcionalnost PMODV aplikacije je testirana za set nominalnih vrednosti struje opterećenja, meteoroloških parametara, za nekoliko tipova provodnika. Ulazni podaci proračuna za temperaturu ambijenta je 35°C, dok su brzina i napadni ugao vetra bili 0.6 m/s i 90°, respektivno. Na dalje, nominalne vrednosti struje opterećenja, za koju vrednost temperature provodnika dostiže 60°C, a potom 80°C, su korištene u proračunu. Ove vrednosti su porikazane u drugoj koloni tabele 2, dok su u trećoj koloni date proračunate vrednosti struje, na izlazu PMODV-a.

TABELA 2 – Rezultati testiranja PMODV aplikacije za grupu nominalnih vrednosti i pet tipova provodnika

Tip provodnika	Temperatura provodnika [°C]	Nominalna vrednost struje [A]	Proračunata vrednost struje [A]
Al/C 150/25	60	325	317
	80	460	450
Al/C 240/40	60	436	433
	80	626	618
Al/C 120/20	60	290	286
	80	405	401
Al/C 490/65	60	661	656
	80	969	956
160-A3-19	60	342	340
	80	487	481

### 4. ZAKLJUČAK

Informacija o termičkom stanju transformatora i dalekovoda je od velikog značaja za efikasnu eksploataciju u elektroenergetskom sistemu. Analiza potencijalne opteretivosti ovih EE elemenata, za prognozirane vrednosti opterećenja i uslove ambijenta, nudi informaciju korisnu prilikom planiranja i donošenja odluka. PMOT i PMODV aplikacije, predstavljaju alat koji, u potpunosti, automatizuje ovu procenu. Zasnivajući se na aktuelnim SCADA vrednostima i verifikovanim, standardnim termičkim modelima transformatora, odnosno, dalekovoda, omogućavaju *real-time* pristup, potencijalno, svakom elementu u sistemu. Aplikacije su implementirane, testirane i u svakodnevnoj su upotrebi, u više RDC-ova u Srbiji. Pored primarne upotrebe u operacionom delu upravljanja EE sistemom, ove aplikacije se preporučuju i u ostalim, inženjerskim i sektorima održavanja, omogućavajući veliku poboljšanje performansi eksploatacije celokupne prenosne mreže i sniženje troškova njenog rada i održavanja.

### LITERATURA

1. Tenbohlen S, Stirl T, Stach M, 2001, "Assessment of Overload Capacity of Power Transformers by On-line Monitoring Systems", "IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, Ohio"
2. [www.epriweb.com](http://www.epriweb.com)
3. [www.edmlink.com](http://www.edmlink.com)
4. [www.kelman.co.uk](http://www.kelman.co.uk)
5. [www.pseg.com](http://www.pseg.com)
6. [www.shawgrp.com](http://www.shawgrp.com)
7. Hunt R, Giordano M.L, "Thermal Overload Protection of Power Transformers –Operating Theory and Practical Experience", 59th Annual Protective Relaying Conference Georgia Tech Atlanta, Georgia, April 27th – 29th, 2005
8. "Loading guide for oil-immersed power transformers" (IEC 354), Geneve, 1991.
9. "The Thermal Behaviour of Overhead Conductors, Section 1 and 2: Mathematical Model for Evaluation of Conductor Temperature in the Steady State and ...", "ELECTRA", "1992", "144"
10. "The Thermal Behaviour of Overhead Conductors, Section 3: Mathematical Model for Evaluation of Conductor Temperature in the Unsteady State" (ELECTRA No. 174, oktobar 1997)

11. Čukalevski N, Jakupović G, Damjanović N, Cvetičanin S, Sajdl T, Krstonijević S, Tomašević B, Mitrović M, "The Data Warehouse for the Multiple ControlCenters Transmission System Operator", Paris, France, 29.08.-03.09. 2004
12. Krstonijević S, Čukalevski N, Jakupović G, Damjanović N, Cvetičanin S, "Real-time transmission elements dynamic loading applications for system operation reliability improvement", 5. Sovetovanje MAKO CIGRE 07.10.-09.10.2007. Ohrid, Makedonija
13. Krstonijević S, Čukalevski N, Jakupović G, Damjanović N, Cvetičanin S, " Real-time transformer dynamic loading application implementation and practical use", DEMSEE 2007, International Workshop on Deregulated Electricity Market Issues in South-Eastern Europe, Dogus University, Istanbul, Turkey, September 19-20, 2007