

ZAGREVANJE TRANSFORMATORA – IDENTIFIKACIJA PROCESA PRIMENOM ARX MODELA

N. VRCELJ*, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla” a.d. Beograd, Srbija
Ž. JANDA, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla” a.d. Beograd, Srbija
D. VUKOTIĆ, „ODS EPS Distribucija” Beograd d.o.o., Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Simulacijama odgovarajućih pogonskih stanja distributivnih mreža značajno se unapređuju analize njihovih eksploatacionih mogućnosti. Na kvalitet rezultata, pored metodologije koja se primenjuje u analizama, najveći uticaj ima kvalitet samog modela, odnosno uvažavanje odgovarajućih pogonskih uslova svakog elementa koji se modeluje.

S obzirom da se najčešće modeluju granična pogonska stanja kao što su minimalno i maksimalno opterećenje mreže, pri proračunima tokova snage i naponskih prilika je vrlo važno uvažiti temperaturu ambijenta, odnosno pogonsku temperaturu elemenata mreže. Za dalekovode se temperatura ambijenta i zagrevanje usled opterećenja obično uvažavaju preračunavanjem podužne električne otpornosti za svaki tip provodnika i za svako stanje koje se modeluje. Za transformatore je zbog kompleksnosti konstrukcije i nelinearnosti procesa koji se odvijaju tokom zagrevanja i hlađenja namotaja transformatora potrebno definisati odgovarajući termički model.

Kako je većina transformatorskih stanica u distributivnoj mreži integrisana u odgovarajući sistem merenja i upravljanja, dostupna su petnaestominutna merenja električnih veličina, kao i temperature: ambijenta, namotaja transformatora i ulja u transformatorskom sudu. Korišćenjem ovih podataka i dostupnih softverskih alata za identifikaciju procesa mogu se definisati jednostavni termički modeli energetskih transformatora pogodni za praktičnu analizu eksploatacionih mogućnosti, bez detaljne analize procesa u samom transformatoru.

Za analize čiji su rezultati prikazani u ovom radu je korišćen ARX matematički model i softverski alat za identifikaciju procesa softverskog paketa MATLAB.

Ključne reči: energetski transformatori, ARX model, identifikacija termičkog procesa

SUMMARY

By simulating the appropriate power distribution network operating points the analysis of their exploitation capabilities is significantly improved. Beside the methodology used in the analyses, the greatest impact to the quality of results obtained has the accuracy of the model itself, or in other words it is necessary to respect the real driving conditions of each element being modeled.

Since extreme operating conditions such as minimum and maximum network load are usually modeled, when calculating power flow and voltage distribution across the network, it is important to take into account the ambient temperature influence and the operating temperature of the network elements. For transmission lines, ambient temperature and load heating are usually taken into account by calculating electrical resistance for each type of conductor. Due to the complexity of the construction and non-linearity of the processes that take place during the heating and cooling of the transformer windings, it is necessary to define the appropriate practical thermal model for power transformers.

Since the most of the power transformer stations in the distribution network are integrated into the some distributed remote measurement and control system, electrical values sampled after fifteen minute interval as well as the ambient temperature, transformer windings and oil temperature are readily available. Using these data and developed software tools to identify the process, a simple practical thermal models of power transformers can be identified, without performing a detailed power transformer nonlinear thermal analysis.

For the purpose of analysis whose results are presented in this paper, the ARX mathematical model and software tool for identification of the processes of the software package MATLAB are used.

Key words: power transformers, ARX model, thermal model identification

Nada VRCELJ, nada.vrcelj@ieent.org

Žarko JANDA, zarko.janda@ieent.org

Dušan VUKOTIĆ, Dusan.Vukotic@epsdistribucija.rs

UVOD

Energetski transformatori su jedna od najskupljih komponenti elektroenergetskog sistema. S obzirom na njihovu brojnost i ulogu u mreži, poznavanje njihovog pogonskog stanja je od suštinskog značaja za minimizaciju ukupnih troškova povezanih sa njihovim pogonom. Temperatura vrele tačke namotaja je jedan od najkritičnijih parametara za definisanje termičkih uslova pogona energetskog transformatora i mogućeg pogona u režimu dozvoljenog preopterećenja, a da se pri tome ona ne može meriti već se procenjuje.

Kako bi se povećala operativna efikasnost i smanjila verovatnoća ispada razvijeno je nekoliko pristupa za nadzor i upravljanje energetskim transformatorima. Svi pristupi se zasnivaju na rezultatima analiza termičkih procesa u transformatorima korišćenjem dinamičkih termičkih modela baziranim na termičko – električnoj analogiji.

TEORIJSKI OSNOV

Za definisanje kvalitetnog termičkog modela transformatora neophodno je poznavanje termičkih procesa koji se odvijaju u svakoj njegovoj komponenti pri različitim radnim režimima. Zagrevanje transformatora je posledica gubitaka koji se generišu u jezgru i namotajima. Prenos toplote se odvija provođenjem, prelaženjem i zračenjem kroz različite materijale i zavisi od načina hlađenja transformatora, odnosno da li se hlađenje odvija prirodnim putem ili pod prinudom. U tom smislu definišu se i različiti termički modeli transformatora. Opšti pristup je takav da se najpre posmatraju termički procesi u svakoj komponenti transformatora, a da se složeniji modeli dobijaju analizom njihovih međusobnih uticaja.

Termičko-električna analogija

Osnovni termički procesi koji se odvijaju u nekoj komponenti transformatora mogu biti predstavljeni sledećom balansom jednačinom energije (1):

$$q \cdot dt = C_{th} \cdot d\theta + \frac{\theta - \theta_{amb}}{R_{th}} \cdot dt \quad \text{ili} \quad q = C_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta - \theta_{amb}}{R_{th}}$$

gde su:

q – snaga generisanja toplote,

C_{th} – termička kapacitivnost,

θ – temperatura,

R_{th} – termički otpor i

θ_{amb} – temperatura ambijenta.

Analogija termičkih veličina sa električnim veličinama se uspostavlja preko jednostavnog RC kola za koje može da se napiše slična jednačina primenom Omovog zakona i I i II Kirhofovog pravila:

$$i = C_{el} \cdot \frac{du}{dt} + \frac{u}{R_{el}}$$

gde su:

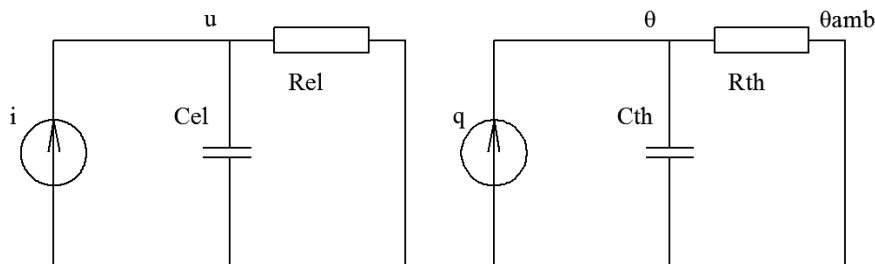
i – električna struja,

C_{el} – električna kapacitivnost,

R_{el} – električni otpor i

u – električni napon.

Na SLICI 1 je prikazano odgovarajuće termičko i električno kolo, a analogija termičkih i električnih veličina je predstavljena TABELOM 1.



SLIKA 1 – JEDNOSTAVNO RC KOLO I NJEMU ANALOGNO TERMIČKO

Termička otpornost može da se definiše kao osobina materijala da se odupire zagrevanju, odnosno toplotnom toku, a termička kapacitivnost kao njegova sposobnost skladištenja toplote. Navedene jednačine važe samo ako se pretpostavi da su termičke karakteristike materijala konstantne, odnosno da ne zavise od temperature.

Kako se pri izradi transformatora koristi više različitih materijala i kako oni nisu svi termički konstantni (viskoznost transformatorskog ulja i sl.), u modelu realnog transformatora je neophodno definisati i nelinearnu termičku otpornost kojom bi se uzele u obzir i pomenute promene.

TABELA 1 – ANALOGIJA TERMIČKIH I ELEKTRIČNIH VELIČINA

Električne veličine		Termičke veličine	
Struja	i	Snaga generisanja toplote	q
Napon	u	Temperatura	θ
Otpornost	R_{el}	Otpornost	R_{th}
Kapacitivnost	C_{el}	Kapacitivnost	C_{th}

Dalje uslozljavanje modela se vrši uvažavanjem drugih veličina koje su od interesa. To mogu biti različite temperature na različitim mestima u istoj komponenti transformatora (npr. temperatura gornjih i donjih namotaja transformatora je različita), kao i temperature ambijenta, odnosno prinudnog hlađenja ako postoji i dr. (2), (3) i (4). Kompleksnost modela zavisi od prirode procesa koji se posmatra.

Identifikacija procesa – ARX model

Pristup modelovanju zagrevanja transformatora može biti drugačiji. Umesto rešavanja složenih matematičkih jednačina dobijenih uspostavljanjem analogije termičkih veličina sa električnim veličinama, mogu se koristiti vremenski nizovi izmerenih veličina kao što su: struje opterećenja transformatora, temperature namotaja i temperature ambijenta. U tom slučaju bi se transformator posmatrao kao homogeno telo na čije zagrevanje najznačajnije utiče struja opterećenja i temperatura ambijenta, a kao mera zagrevanja bi se imala temperatura namotaja.

Pomoću programskog paketa MATLAB se korišćenjem poznatih veličina i autoregresivnih matematičkih modela (skr. ARX – autoregressive exogenous) mogu matematički opisati, odnosno identifikovati, termički procesi u transformatoru bez detaljnog poznavanja tih procesa (5) i (6).

Pod pretpostavkom da trenutna vrednost neke promenljive zavisi od prethodne vrednosti te iste promenljive i , u najjednostavnijem slučaju, još jedne promenljive, struktura ARX modela može da se predstavi pomoću sledeće linearne diferencijalne jednačine:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_1 u(t-n_k) + \dots + b_{n_b} u(t-n_k - n_b + 1) + e(t)$$

ili izraženo preko operatora kašnjenja q :

$$A(q)y(t) = B(q)u(t-n_k) + e(t)$$

Operator kašnjenja je definisan kao:

$$y(t) = qy(t-1), \text{ odnosno } u(t-n_k) = qu(t-n_k-1)$$

dok koeficijenti iz jednačine imaju sledeći oblik:

$$A(q) = a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad \text{i} \quad B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b+1}$$

gde su:

$y(t)$ – trenutna vrednost izlazne promenljive u trenutku t ,

n_a – red polinoma $A(q)$,

n_b – red polinoma $B(q)$ uvećan za jedan,

n_k – broj ulaznih uzoraka koji se javljaju pre nego što ulazna promenljiva utiče na izlaznu (naziva se i mrtvo

vreme u sistemu),

$y(t-1) \dots y(t-n_a)$ – prethodne vrednosti izlazne promenljive,

$u(t-n_k) \dots u(t-n_k-n_b+1)$ – prethodne i odložene ulazne promenljive od kojih zavisi trenutna promenljiva,

$e(t)$ – vrednost belog šuma (poremećaj, sadrži vrednosti $e(t-1) \dots e(t-n_c)$)

$a_1 \dots a_{n_a}$ – koeficijenti koji se odnose na prethodne vrednosti izlazne promenljive,

$b_1 \dots b_{n_b}$ – koeficijenti koji se odnose na prethodne vrednosti ulazne promenljive.

U slučaju identifikacije procesa u transformatoru imaju se dva ulazna vremenska niza i jedan izlazni, tako da ARX model ima isti oblik, ali se n_k i n_b definišu za svaki ulaz posebno. Vrednost šuma $e(t)$ se u ovom slučaju zanemaruje.

PRIMER IDENTIFIKACIJE PROCESA

Na raspolaganju za analizu su se imala petanaestominutna merenja električnih veličina na niženaponskoj strani transformatora T1 u TS 35/10 kV Galenika i odgovarajućih merenja temperature namotaja i temperature ambijenta. Reč je o jedinici snage 8 MVA koja se nalazi na otvorenom i pri stalnom uklopnom stanju najvećim delom napaja proizvodni kompleks preduzeća Galenika, odnosno hemijsku industriju. Posmatrani transformator je proizveden 1969. godine i kao rashladni fluid koristi transformatorsko ulje.

Identifikacija procesa zagrevanja – formiranje odgovarajućeg ARX modela

Kao ulazne veličine za definisanje odgovarajućeg ARX modela su korišćene izmerene vrednosti struje opterećenja i temperature ambijenta, a kao izlazna veličina poslužile su izmerene vrednosti temperature namotaja. S obzirom da su posmatrani samo termički procesi i da je transformator tretiran kao homogeno telo bez detaljnog sagledavanja svih procesa u svim njegovim komponentama, za proračune je korišćena pojednostavljena zamenska šema prikazana na SLICI 2.

Transformator je posmatran kao aktivna električna otpornost kroz koji protiče struja sekundara. Razlog da se ovako postupi proističe iz činjenice da se najveći deo toplote u transformatoru generiše u namotajima i da je srazmeran proizvodu kvadrata struje opterećenja primara i sekundara i odgovarajućih električnih otpornosti.

Pošto za razmatrani period nije vršeno ispitivanje posmatranog transformatora i nisu bile poznate realne električne otpornosti primarnog i sekundarnog namotaja, kao konkretna ulazna veličina je korišćen samo deo proračunate vrednosti snage Džulovih gubitaka, odnosno samo deo koji nije konstantan u sledećoj formuli:

$$P_J = R(\theta_n) I^2 = k I^2 (235 + \theta_n) / (235 + 20)$$

gde je,

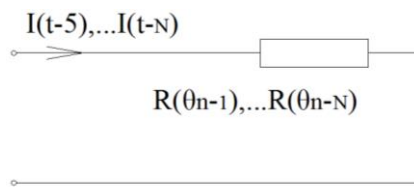
P_J – snaga Džulovih gubitaka zamenskog otpornika u pojednostavljenoj šemi transformatora,

$R(\theta_n)$ – zamenska električna otpornost namotaja transformatora na temperaturi θ_n

θ_n – izmerena temperatura namotaja,

I – izmerena vrednost struje opterećenja transformatora na sekundarnoj strani,

k – konstanta koja nije poznata i čiji je iznos zanemaren, jer za identifikaciju procesa nije od značaja.



N – broj odbiraka koji učestvuju u identifikaciji,
 $I(t-1), \dots, I(t-N)$ – izmerene vrednosti struje sekundara koje učestvuju u identifikaciji,
 $R(\theta_{n-1}), \dots, R(\theta_{n-N})$ – zamenske otpornosti koje učestvuju u identifikaciji.

SLIKA 2 – POJEDNOSTAVLJENA ZAMENSKA ŠEMA TRANSFORMATORA

Analizom raspoloživih podataka je ustanovljeno da se oblik dnevnog dijagrama opterećenja transformatora T1 u TS 35/10 kV Galenika značajno razlikuje za dane vikenda i dane praznika u odnosu na ostale dane u sedmici, ali i da se srednja vrednost struje na nivou dana takođe menja sa srednjom dnevnom temperaturom ambijenta. Iz tog razloga je za formiranje modela uzet opseg podataka od godinu dana, odnosno sva četiri godišnja doba. Podaci su grupisani u klimatološkom smislu, odnosno prema kretanju srednjih dnevnih i maksimalnih temperatura po mesecima u godini za područje Srbije [7]:

- proleće od 10. marta do 25. maja (77 dana),
- leto od 26. maja do 11. septembra (109 dana),
- jesen od 12. septembra do 23. novembra (73 dana) i
- zima od 24. novembra do 9. marta (106 dana).

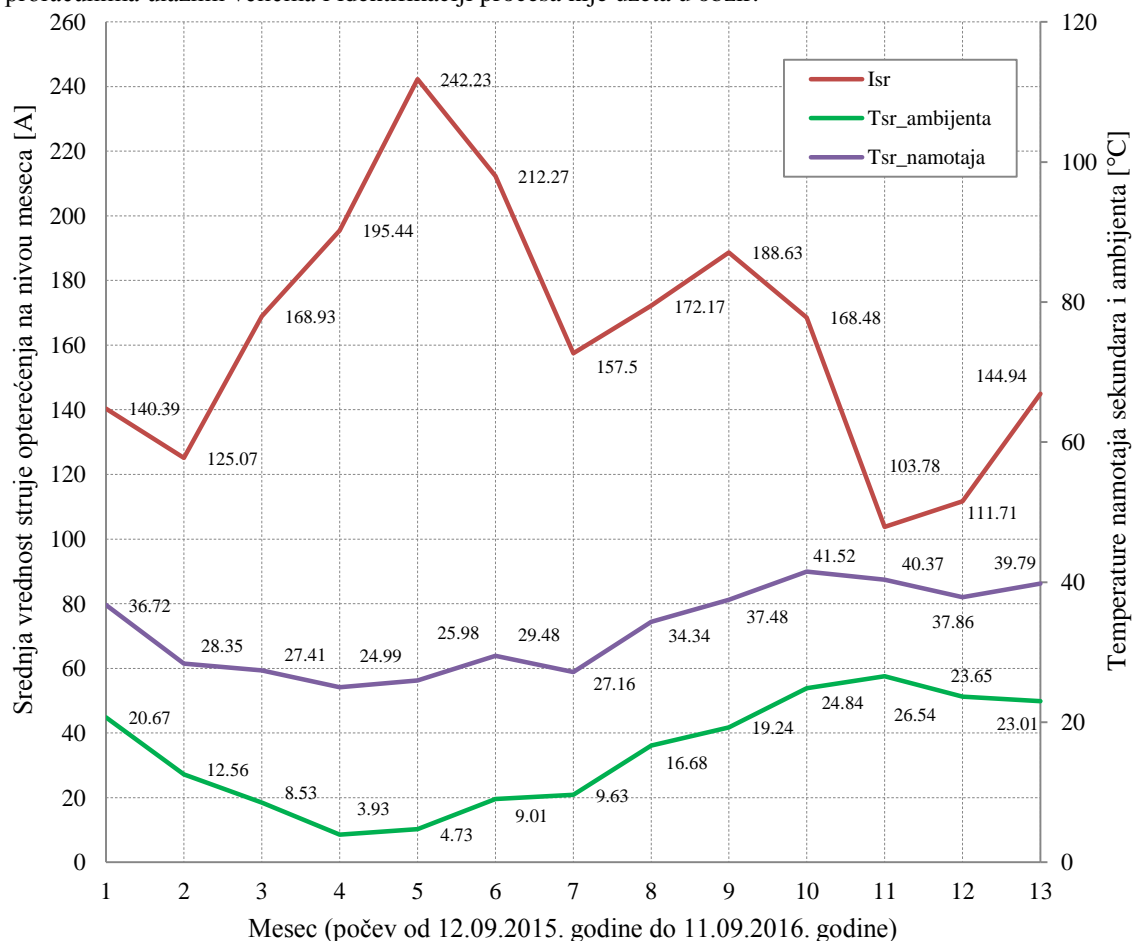
U primeru koji je obrađen je posmatran period od 12.09.2015 do 11.09.2016. godina. Srednje vrednosti struje opterećenja, kao i temperatura ambijenta i namotaja na mesečnom nivou su prikazane na SLICI 3. Najveće opterećenje se imalo u januaru 2015. godine (242.23 A) u periodu najnižih temperatura. Pretpostavka je da se u ovom periodu imala uvećana potrošnja u odnosu na proleće i jesen zbog potrebe grejanja poslovnih prostorija Galenike. Najniže opterećenje se imalo u avgustu 2016. godine (103.78 A) u periodu kada su se imale najviše temperature i koji se poklapa sa sezonom godišnjih odmora.

Sa aspekta modelovanja može se reći da su trendovi ulaznih promenljivih u periodu leta i zime suprotstavljene, odnosno da je dominantan uticaj na zagrevanje transformatora imala temperatura ambijenta. Iz tog razloga je bilo interesantno da se istraži u kojoj meri će se razlikovati modeli za ova dva godišnja doba.

U toku prolaća i jeseni ulazne promenljive su imale usaglašene trendove i ideja je bila da se i za ova dva godišnja doba identifikuju posebni modeli i da se ustanovi nivo njihovog međusobnog poklapanja.

S obzirom da se neradni dani u nedelji periodično ponavljaju, nije vršeno razvrstavanje podataka po tipu dana. Nedostajuća merenja u trajanju od najviše tri odbirka (45 min) su proračunavana kao aritmetička sredina poslednje poznate izmerene vrednosti i prve vrednosti koja se imala nakon što se proces merenja ponovo uspostavio. Iz podataka za obradu su isključeni intervali izmerenih veličina za koje se nije raspolagalo većim brojem merenja i koji su se odnosili na situacije kada se prema obliku dnevnog dijagrama moglo zaključiti da su se imale promene uklopnog stanja u mreži 10 kV (značajne skokovite promene struje opterećenja koje nisu posledica uobičajenog ponašanja konzuma koji se napaja preko posmatranog transformatora).

Promena napona na sekundaru transformatora, bez obzira što ima uticaja na zagrevanje transformatora, pri proračunima ulaznih veličina i identifikaciji procesa nije uzeta u obzir.



SLIKA 3 – SREDNJE MESEČNE VREDNOSTI STRUJE OPTEREĆENJA, TEMPERATURE AMBIJENTA I TEMPERATURE NAMOTAJA TRANSFORMATORA

Da bi se dobio što kvalitetniji model izvršeno je međusobno poređenje reda veličina svih promenljivih koje učestvuju u proračunu. Zbog velike međusobne razlike je proračunata snaga Džulovih gubitaka umanjena deset hiljada puta. Primer skupa podataka koji su korišćeni za formiranje modela transformatora, a odnose se na proleće 2016. godine, je prikazan u TABELI 2.

TABELA 2 – PRIKAZ ULAZNIH PROMENLJIVIH ZA PROLEĆE 2016. GODINE (10. MART – 25. MAJ)

Redni br.	Datum	I [A]	θ_{amb} [°C]	θ_{nam} [°C]	$P_{y/k} * 10^{-4}$ [A ²]
1	10.03.16 00:00	142.00	8.18	27.30	2.0741
2	10.03.16 00:15	142.00	8.18	27.30	2.0741
3	10.03.16 00:30	150.00	8.18	27.30	2.3144
4	10.03.16 00:45	154.00	8.18	27.30	2.4395
5	10.03.16 01:00	150.00	8.18	27.30	2.3144
.
.
.
.
7385	25.05.16 22:15	152.00	16.36	36.86	2.4632
7386	25.05.16 22:30	150.00	16.04	35.93	2.3906
7387	25.05.16 22:45	148.00	15.99	35.78	2.3259
7388	25.05.16 23:00	148.00	15.96	35.72	2.3254
7389	25.05.16 23:15	144.00	16.28	35.65	2.2009
7390	25.05.16 23:30	148.00	16.34	34.99	2.3192

Prilikom učitavanja podataka u softverskom paketu MATLAB prilikom pokretanja funkcije IDENT, kao vreme uzimanja odbiraka, definisano je vreme od 900 s (15 min), odnosno preslikano je realno vreme merenja za sva četiri godišnja doba. Nakon učitavanja podataka za svako godišnje doba je izvršena priprema podataka tako što su dijagrami normirani, odnosno izvršeno je uklanjanje srednje vrednosti iz podataka koji predstavljaju ulaze. Zatim je za svaki model (godišnje doba) definisan broj odbiraka pomoću kojih se vrši procena i odgovarajući broj odbiraka na kojoj se vrši validacija dobijenog modela.

U programu se za procenu prilagođenosti simulirane izlazne promenljive merenoj izlaznoj promenljivoj koristi metoda najmanjih kvadrata i primenjuje se i pri proceni i pri validaciji. U svim slučajevima koji su obrađeni su za validaciju modela korišćeni podaci koji nisu korišćeni za procenu. Dužina nizova podataka je zavisila od oblika dijagrama ulaznih promenljivih. Tako je za identifikaciju procesa u periodu zime iz niza podataka na kojima je vršena validacija izbegnut deo podataka između 30.12.2015. i 7.01.2016. godine, jer je oblik dijagrama bio neuobičajen, odnosno smatra se da je u tom periodu bilo više promena uklopnog stanja u mreži 10 kV i da taj deo dijagrama nije relevantan za analize.

Prikaz dobijenih modela po godišnjim dobima i prilagođenost simuliranih dijagrama izlaza odgovarajućim merenim dijagramima za svaki model su dati kao TABELA 3. Prilagođenost je definisana kao:

$$FIT = \left[1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{mi} - y_{si})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{mi} - y_{sr})^2}} \right] 100\% ,$$

gde su:

FIT – prilagođenost simuliranih izlaza odgovarajućim merenim dijagramima,

N – broj odbiraka na kojim se vrši procena ili validacija,

y_{mi} – merena vrednost i -tog odbirka izlazne promenljive,

y_{si} – simulirana vrednost i -tog odbirka izlazne promenljive,

y_{sr} – srednja vrednost merene izlazne promenljive za posmatrani period (odbirci $i=1,2,... N$).

TABELA 3 – PRIKAZ DOBIJENIH ARX MODELA ZA ANALIZIRANI PERIOD

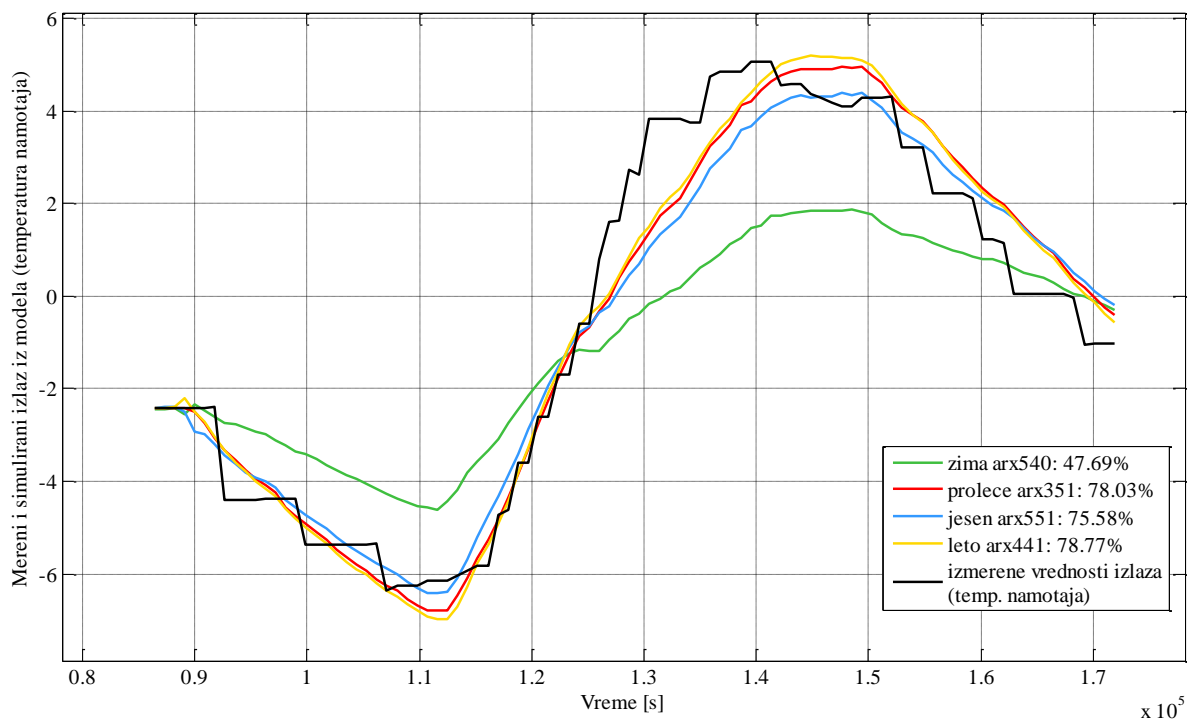
ARX model: $A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$; $e(t)=0$; z - operator kašnjenja;	Prilagođenost podacima za procenu	Prilagođenost podacima za validaciju
Model za jesen (19.09. - 23.11.2015) - jesena arx551		
$A(z) = 1 - 0.7881z^{-1} - 0.09866z^{-2} - 0.07545z^{-3} - 0.01221z^{-4} + 0.0347z^{-5}$	92.19%	71.96%
$B1(z) = 0.1158z^{-1} + 0.009065z^{-2} - 0.01059z^{-3} - 0.01149z^{-4} - 0.0498z^{-5}$		
$B2(z) = 0.3262 - 0.1627z^{-1} - 0.007203z^{-2} - 0.05149z^{-3}$		
Model za zimu (24.11.2015. - 9.03.2016.) - zima arx540		
$A(z) = 1 - 0.8853z^{-1} - 0.101z^{-2} - 0.05027z^{-3} - 0.04223z^{-4} + 0.0956z^{-5}$	90.84%	42.18%
$B1(z) = 0.06773 + 0.01102z^{-1} + 0.01712z^{-2} - 0.08076z^{-3}$		
$B2(z) = 0.132z^{-1} + 0.001761z^{-2} + 0.00878z^{-3} - 0.1112z^{-4}$		
Model za proleće (10.03.-25.05.2016.) - prolece arx351		
$A(z) = 1 - 0.728z^{-1} - 0.1206z^{-2} - 0.05627z^{-3}$	92.11%	81.91%
$B1(z) = 0.1309z^{-1} - 0.006519z^{-2} - 0.01899z^{-3} - 0.009075z^{-4} - 0.01113z^{-5}$		
$B2(z) = 0.275 - 0.07626z^{-1} - 0.007738z^{-2} - 0.05347z^{-3}$		
Model za leto (26.05-11.09.2016.) - leto arx441		
$A(z) = 1 - 0.77z^{-1} - 0.1153z^{-2} - 0.04846z^{-3} + 0.02847z^{-4}$	91.17%	76.74%
$B1(z) = 0.1103z^{-1} + 0.03266z^{-2} - 0.02076z^{-3} - 0.03781z^{-4}$		
$B2(z) = 0.1669z^{-1} + 0.008269z^{-2} - 0.02493z^{-3} - 0.02716z^{-4}$		

Izbor reda polinoma za svaki model je vršen tako što je variran veći broj slučajeva. U slučajevima gde su korišćeni polinomi većeg reda procenat prilagođenosti podacima za procenu je bio približno isti kao u slučajevima koji su prikazani u TABELI 3. Iz tog razloga se smatralo da nema potrebe da se račun usložnjava. Kada su razmatrani slučajevi sa polinomima manjeg reda od prikazanih, procenat prilagođenosti podacima za procenu je bio značajno niži.

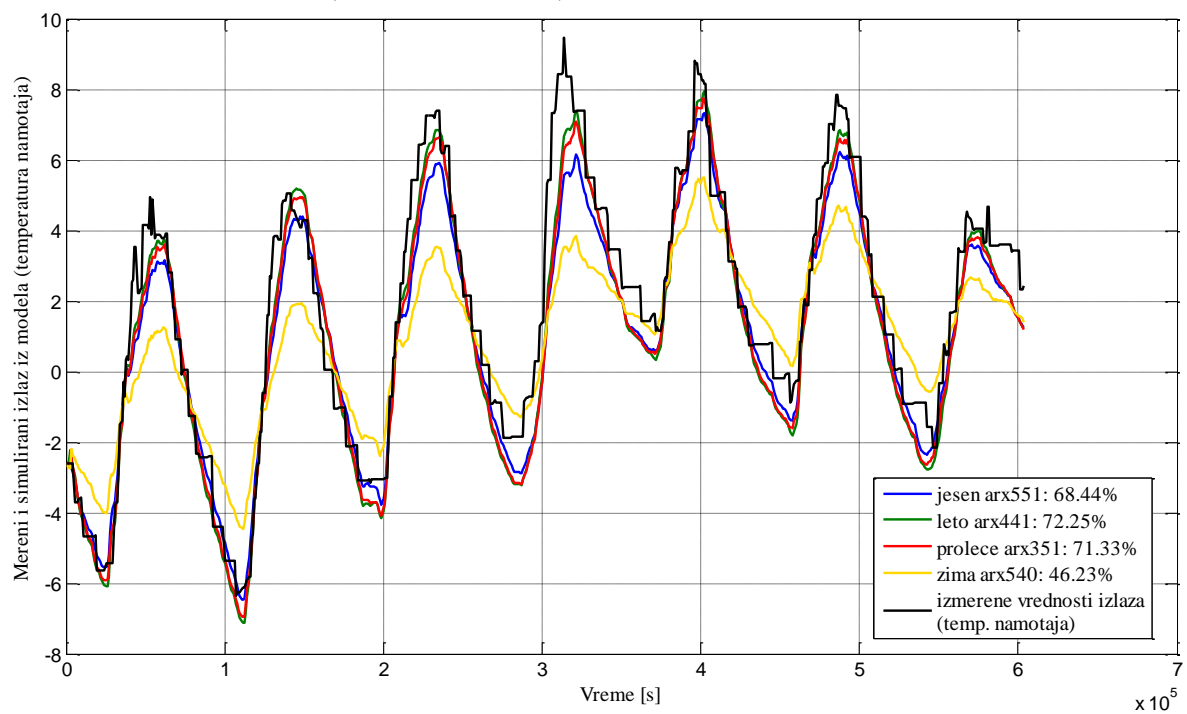
Procenat prilagođenosti podacima za validaciju nije toliko zavisio od reda polinoma koliko od izbora vremenskog niza podataka na kojem se vršila validacija. S obzirom da se nije raspolagalo merenjima za više godina, odnosno da su iskorišćeni svi raspoloživi podaci, smatra se da su u ovom segmentu analize mogle biti obimnije.

Poređenje dobijenih ARX modela – rezultati

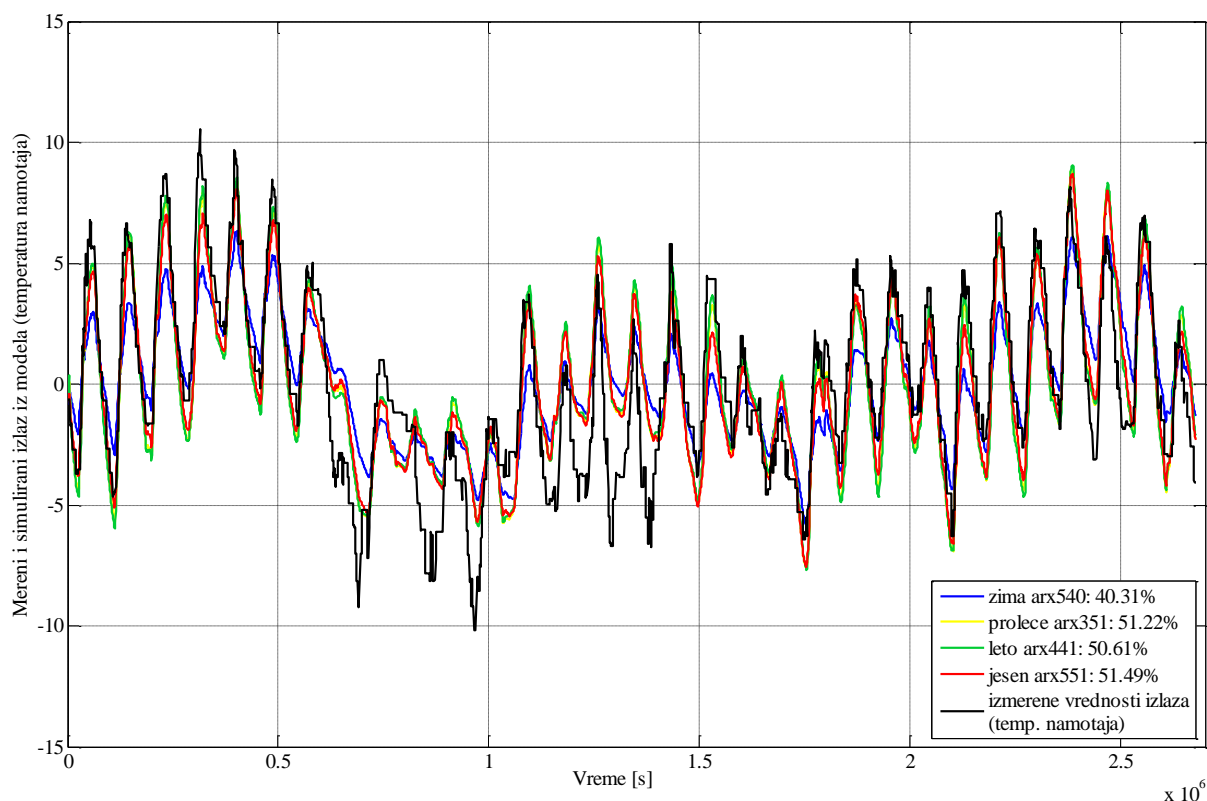
Nakon što je izvršena identifikacija procesa, odnosno definisan model za svako godišnje doba, pristupilo se proveriti poklapanja simuliranih izlaza svakog modela sa merenim vrednostima kada se na ulazu u model imaju ulazne promenljive različitog trajanja. Naime, kao ulazi su najpre korišćeni podaci za jedan dan, zatim za jednu sedmicu i na kraju za jedan mesec. Odgovarajući dijagrami izlaza su prikazani na SLICI 4, SLICI 5 i SLICI 6.



SLIKA 4 – PRILAGOĐENOST SIMULIRANE IZLAZNE PROMENLJIVE MERENOJ ZA SLUČAJ JEDNOG DANA (2.10.2015. GODINE)



SLIKA 5 – PRILAGOĐENOST SIMULIRANE IZLAZNE PROMENLJIVE MERENOJ ZA SLUČAJ JEDNE SEDMICE (1–7.10.2015. GODINE)



SLIKA 6 – PRILAGOĐENOST SIMULIRANE IZLAZNE PROMENLJIVE MERENOJ ZA SLUČAJ JEDNOG MESECA (1–30.10.2015. GODINE)

S obzirom da se raspolagalo samo sa podacima koji su korišćeni za definisanje modela, za poređenje je uzet vremenski niz podataka koji se odnosi na oktobar 2015. godine. Razlog da se ovako postupi je bio što se u toku ovog meseca imala relativno visoka srednja vrednost temperature ambijenta, odnosno 27.27 °C. Za ovako visoke dnevne temperature se očekivalo da će model za leto dati najveći procenat poklapanja sa merenim izlazom, bez obzira što razmatrani period kalendarski pripada drugom godišnjem dobu. Kroz analizu se za prvi i drugi slučaj pretpostavka pokazala kao tačna, a model za zimu je očekivano u sva tri slučaja dao najniži procenat poklapanja. U slučaju kada je razmatran čitav mesec, u periodu 8.10.-18.10.2015. godine (SLIKA 6 – deo dijagrama između $0.5 \cdot 10^6$ s i $1.5 \cdot 10^6$ s) se imao najveći procenat poklapanja u modelu za jesen, jer je srednja dnevna temperatura ambijenta tih dana bila značajno niža od mesečnog proseka.

Kada se sva tri slučaja uporede međusobno, može se reći da procenat poklapanja simulirane izlazne promenljive sa merenim vrednostima opada sa produžetkom vremenskih okvira razmatranih ulaznih promenljivih. Takođe se zaključuje da je u trećem slučaju procenat poklapanja za sve modele nizak i iz razloga što je u toku posmatranog meseca bilo izraženo variranje temperature ambijenta.

S obzirom da je identifikacija procesa u transformatoru bila vršena na osnovu podataka koji su odgovarali godišnjim dobima definisanim prema kretanju srednjih dnevni i maksimalnih temperatura po mesecima za područje Srbije, a da su se najbolji rezultati dobili u slučaju kada je razmatran period od jednog dana, dominantan uticaj na procenat poklapanja merenog i simuliranog izlaza ima srednja dnevna temperatura za period koji se posmatra.

ZAKLJUČAK

Kada je energetska transformator u pogonu, jedan deo ulazne električne snage se pretvori u toplotu. Deo toplote koji se stvara u jezgri transformatora je daleko manji od dela toplote koji se stvara u namotajima. Ako se zanemari sopstveno zagrevanje jezgra usled vrtložnih struja, može se reći da zagrevanja transformatora direktno zavisi od kvadrata struje opterećenja i električne otpornosti namotaja. Ukoliko je toplota koja se stvori u transformatoru veća od toplote koja se odvede hlađenjem, temperatura jezgra i namotaja raste. Dakle, osim konstrukcionih karakteristika i načina hlađenja transformatora, na proces zagrevanja značajno utiče i temperatura ambijenta.

Korišćenjem analogije termičkih i električnih veličina i odgovarajućih softverskih alata može se formirati kvalitetan model transformatora, bez detaljnog poznavanja svih procesa koji se odvijaju u samom transformatoru.

Modeli dobijeni na ovaj način mogu da se koriste za simulaciju složenih pogonskih stanja u sklopu modela drugih komponenti i drugih termičkih uticaja. Takođe, model može imati i prediktivni karakter, odnosno da se kao ulazne promenljive koriste prognozirane vrednosti i da se na osnovu njih dobije prognoza izlazne promenljive. Drugim rečima, model može imati širu primenu.

S obzirom da je posmatrani transformator u pogonu već 49 godina i da je priroda konzuma koji se napaja preko njega specifična, radi dobijanja kvalitetnijeg modela naophodan je širi vremenski opseg ulaznih podataka, kao i poznavanje istorije događaja na mreži u smislu kvarova i havarija, odnosno promena uklopnog stanja. Naime, značajne diskretne promene opterećenja otežavaju identifikaciju termičkih procesa u transformatoru i neophodna je klasterizacija podataka koji se koriste kako za procenu tako i za validaciju modela.

Pokazano je da primena ARX modela za identifikaciju termičkih procesa u transformatorima može dati kvalitetne rezultate, pri čemu je naročito važno da vrednosti srednjih dnevnih temperatura vremenskih intervala koji se koriste za identifikaciju procesa i za verifikaciju dobijenog modela budu što bliže. Pošto su u ovom radu prikazani rezultati analiza sprovedenih na samo jednom transformatoru sa specifičnim dijagramom opterećenja, u uslovima ograničenog broja potrebnih podataka, da bi se na pravi način vrednovale mogućnosti prikazanog pristupa neophodna su dodatna istraživanja na ovom polju.

LITERATURA

1. Swift G., Molinski T.S., Lehn W., „A fundamental approach to transformer thermal modelling- I. Theory and equivalent circuit”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, Iss. 2, April 2001, pp. 171 - 175
2. Radaković Z., Feser K., „A new method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, October 2003, pp. 1284 – 1292
3. Radaković Z., Šorgić M., Van der Veken W., Claessens G., „Ratings of oil power transformer in different cooling modes”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, April 2012, pp. 618 – 625
4. Radaković Z., Maksimović S., „Non-stationary thermal model of indoor transformer stations”, Electrical Engineering 84, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002, pp. 109 – 117
5. <https://www.mathworks.com>
6. Ljung L., „System identification toolbox”, The MathWorks, Natick MA, 1995.
7. <https://www.opsteobrazovanje.in.rs/geografija/godisnja-doba/>