

# Određivanje ustaljene temperature i vremenske konstante zagrevanja namotaja obrtnih električnih mašina primenom numeričke ekstrapolacije

Mr Dragan T. Stanković, dipl.inž.<sup>1)</sup>

Za određivanje ustaljene vrednosti porasta temperature zagrevanja  $\theta_u$  i vremenske konstante zagrevanja namotaja  $T$  obrtnih električnih mašina, prezentirana je primena numeričke ekstrapolacije krive hlađenja električnih obrtnih mašina, umesto standardima preporučene grafičke ekstrapolacije. Analizirana je greška primenjene metode promene električne otpornosti namotaja u određivanju veličina  $\theta_u$  i  $T$ , evidentirani su faktori koji utiču na veličinu procentualne greške i dati optimalni uslovi primene metode, koji bi procentualne greške sveli na prihvatljive.

*Ključne reči:* Obrtne električne mašine, namotaji, ustaljena temperatura zagrevanja, vremenska konstanta zagrevanja, numerička ekstrapolacija, procentualna greška.

## Uvod

USTALJENA vrednost porasta temperature zagrevanja namotaja obrtnih električnih mašina  $\theta_u$  se uobičajeno određuje ogledom hlađenja električne mašine, nakon što je, pre toga, postignuto ustaljeno toplotno stanje u ogledu zagrevanja električne mašine [1-3]. Ogled zagrevanja se vrši u režimu trajnog rada mašine opterećene nazivnom snagom pri nazivnom naponu napajanja (pri konstantnoj vrednosti nazivne snage električnih gubitaka u razmatranom namotaju).

Promena porasta temperature zagrevanja namotaja u toku ogleda hlađenja električne mašine  $\theta(t)$  određuje se iz promene električne otpornosti namotaja. Električna otpornost namotaja meri se metodom napon/struja (U/I metodom). U električno kolo namotaja unosi se jednosmerna struja poznate jačine  $I_m$  (A), a na krajevima namotaja meri se pad napona  $U$  (V) koji stvara struja  $I_m$  protičući kroz namotaj električne otpornosti  $R$  ( $\Omega$ ). Količnik izmerenih vrednosti napona  $U$  i struje  $I_m$  daje traženu vrednost električne otpornosti namotaja  $R$ .

Merenje električne otpornosti namotaja počinje u toku ogleda hlađenja neposredno posle prekida napajanja i zaustavljanja električne mašine. Na namotaj, čija se električna otpornost meri, priključuje se, što je moguće pre, već pripremljeno strujno kolo za primenu U/I metode. U standardima [1-3] definisano je vreme kašnjenja  $t_x$  i ono je jednako 30s, 90s, 120s za električne mašine nazivnih snaga do 50 kW (kVA), 200 kW (kVA), odnosno 5000 kW (kVA), respektivno. Kada se prvo merenje električne otpornosti namotaja izvrši unutar vremenskog intervala ograničenog vremenom  $t_x$ , izmerena vrednost se usvaja kao veličina električne otpornosti  $R_u$ , koja odgovara ustaljenoj vrednosti temperature namotaja  $\theta_u$ .

Kada je vreme do prve izmerene vrednosti električne otpornosti namotaja  $t_0$  veće od vremena  $t_x$ , ali ne i od njegove dvostruke vrednosti, vrši se niz uzastopnih merenja električne otpornosti namotaja u dovoljno dugom periodu. Na osnovu dobijenih rezultata vrši se grafička ekstrapolacija krive  $R=f(t)$  do vremena  $t_x$ , uz pomoć krive  $\ln(R(t)-R_a)$  nacrtane u polulogaritamskom koordinatnom sistemu. Ekstrapolacijom dobijena vrednost  $R(t_x)$  se usvaja kao električna otpornost namotaja  $R_u$  u trenutku isključenja mašine.

Ako početna uzastopna merenja ukazuju najpre na povećanje električne otpornosti, za veličinu  $R_u$  se uzima najveća izmerena vrednost električne otpornosti.

Postupak grafičke ekstrapolacije prate mnogobrojne nepreciznosti, pa su nepouzdanе procene vrednosti temperature zagrevanja namotaja. Cilj rada je da prezentira primenu analitičkog postupka ekstrapolacije krive hlađenja namotaja električnih mašina primenom principa najmanjih kvadrata u numeričkoj obradi rezultata, i omogući tačnije određivanje ustaljene vrednosti temperature zagrevanja, a paralelno i određivanje vremenske konstante zagrevanja namotaja - što grafičkom ekstrapolacijom nije moguće učiniti.

Analiziraće se i uslovi za optimalnu primenu ove metode, da bi procentualne greške u određivanju ustaljene temperature zagrevanja i vremenske konstante zagrevanja namotaja bile u prihvatljivim granicama.

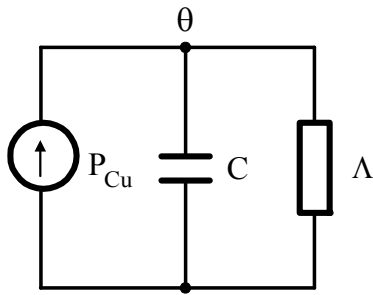
## Termički model električne mašine

Obrtne električne mašine u termičkom smislu, predstavljaju složeno telo sačinjeno od većeg broja elementarnih, homogenih tela (namotaji statora i rotora, magnetna kola statora i rotora, kućište mašine i dr.).

Radi pojednostavljenja analize pojave zagrevanja

<sup>1)</sup> Tehnički opitni centar, 11000 Beograd, Vojvode Stepe 445

električnih mašina, uobičajeno je da se električna mašina, ili njen deo razmatraju kao homogeno, jednorodno telo [4,5]. U skladu sa tim, na sl.1 je predstavljena ekvivalentna termička šema namotaja električne mašine.



**Slika 1.** Ekvivalentna šema namotaja obtorne električne mašine kao termičkog kola prvog reda:  $P_{Cu}$  (W) - snaga gubitaka u namotajima električne mašine koja se pretvara u toplotnu energiju;  $C$  (Wmin/°C) - toplotna kapacitivnost namotaja električne mašine;  $\Lambda$  (W/°C) - toplotna provodnost između namotaja električne mašine i rashladnog ambijenta;  $\theta$  (K) =  $\vartheta$  (°C) -  $\vartheta_a$  (°C) - porast temperature zagrevanja namotaja električne mašine u odnosu na temperaturu rashladnog ambijenta  $\vartheta_a$ .

U skladu sa termičkim modelom (sl.1), zagrevanje namotaja opisano je diferencijalnom jednačinom:

$$T \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_u \quad (1)$$

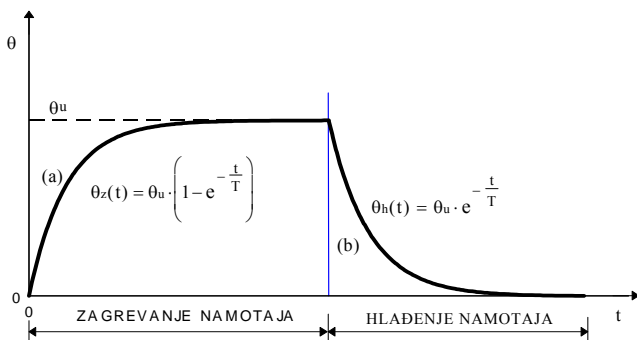
gde su:

$$T = \frac{C}{\Lambda} \quad \text{- vremenska konstanta zagrevanja namotaja,}$$

$$\theta_u = \frac{P_{Cu}}{\Lambda} \quad \text{- ustaljena vrednost porasta temperature zagrevanja namotaja.}$$

Usvojeno je da termička provodnost  $\Lambda$  ne zavisi od temperature.

Rešenje diferencijalne jednačine (1) daje poznati izraz za vremensku promenu porasta temperature zagrevanja namotaja  $\theta_z(t)$  (kriva (a) sl.2).



**Slika 2.** Krive porasta temperature zagrevanja (a) i hlađenja namotaja (b) električne mašine

Termički model na sl.1 i diferencijalna jednačina (1) omogućavaju analizu procesa hlađenja namotaja električne mašine, nakon što je prethodno uspostavljeno ustaljeno stanje procesa zagrevanja. U tom slučaju, uz  $P_{Cu} = \theta$  i početni uslov  $\theta(0) = \theta_u$ , rešenjem diferencijalne jednačine (1) dobija se kriva hlađenja namotaja električne mašine  $\theta_h(t)$  (kriva (b) na sl.2).

U stvarnosti, posle zaustavljanja rotora električne mašine dolazi do naglog smanjenja intenziteta hlađenja namotaja, zbog čega temperatura namotaja malo poraste u odnosu na ostvarenu ustaljenu vrednost u režimu zagrevanja, a zatim

nakon vremena  $\approx tx$ , počinje da opada po krivoj  $\theta_h(t)$ .

Prema termičkom modelu namotaja električne mašine (sl.1), vremenske konstante zagrevanja i hlađenja namotaja su jednake. U stvarnosti, vremenska konstanta hlađenja je malo veća od vremenske konstante zagrevanja.

Toplotna vremenska konstanta, dobijena iz krive hlađenja namotaja, odnosi se na nepokretni rotor električne mašine, i može da se koristi za analizu toplotnih pojava u nekim određenim tipovima pogona električnih mašina (S3, S4, S5 i S7).

### Određivanje ustaljene temperature i vremenske konstante zagrevanja namotaja primenom numeričke ekstrapolacije

Porast temperature zagrevanja namotaja  $\theta$  u odnosu na temperaturu rashladnog ambijenta, na kraju ogleda zagrevanja  $\vartheta_a$  moguće je izračunati korišćenjem sledeće jednačine:

$$\theta = \vartheta_t - \vartheta_h = \frac{R_t - R_h}{R_h} \cdot (235 + \vartheta_h) + (\vartheta_h - \vartheta_a) \quad (2)$$

Električna otpornost hladnog namotaja  $R_h$  je izmerena pre početka ispitivanja na proizvoljnoj temperaturi okoline  $\vartheta_h$ , najčešće na temperaturi rashladnog ambijenta  $\vartheta_a$  neposredno pre početka ogleda zagrevanja ( $\vartheta_h = \vartheta_a$ , odnosno  $R_h = R_a$ ). Električna otpornost toplog namotaja  $R_t$  predstavlja vrednost električne otpornosti na kraju ogleda zagrevanja, kada je ostvarena ustaljena temperatura zagrevanja namotaja ( $\vartheta_t = \vartheta_u$ , odnosno  $R_t = R_u$ ).

Jednačina (2) se može napisati i u sledećem obliku:

$$\theta(t) = \vartheta(t) - \vartheta_a = \frac{R(t) - R_a}{R_a} \cdot (235 + \vartheta_a) = \Delta R(t) \cdot r \quad (3)$$

gde su:

$\Delta R(t) = R(t) - R_a$  - vremenska promena porasta električne otpornosti namotaja u odnosu na vrednost električne otpornosti namotaja na temperaturi rashladnog ambijenta;

$$r = \frac{235 + \vartheta_a}{R_a} \quad \text{- konstanta.}$$

Pomoću jednačine (3) i krive hlađenja namotaja električne mašine  $\theta_h(t)$ , može da se izvede jednačina promene porasta električne otpornosti namotaja u režimu hlađenja električne mašine:

$$\Delta R(t) = \Delta R_u e^{-\frac{t}{T}} \quad (4)$$

Logaritmovanjem jednačine (4), dobija se jednačina prave:

$$\ln \Delta R(t) = \ln \Delta R_u - \frac{t}{T} = a - b \cdot t \quad (5)$$

gde su:

$\ln \Delta R(t) = \ln(R(t) - R_a)$  - nova zavisno promenljiva veličina;

$$a = \ln \Delta R_u ; \quad b = \frac{1}{T} \quad \text{- koeficijenti krive regresije.}$$

Umesto grafičkog postupka ekstrapolacije krive (5), koji preporučuju standardi [1-3], za određivanje vrednosti porasta električne otpornosti namotaja  $\Delta R_u$  (koja odgovara ustaljenoj vrednosti porasta temperature zagrevanja

namotaja  $\theta_u$ ) i vremenske konstante zagrevanja  $T$  primenićemo odgovarajući numerički metod.

Kako se ekstrapolacija krive  $\Delta R(t)$  vrši u skladu sa standardizovanim metodom, do deklarisanog vremena  $t_x$ , u jednačini (5) potrebno je  $t$  zameniti sa  $t' = t - t_x$ .

Primenom principa najmanjih kvadrata na jednačinu (5) dobija se sistem od dve algebarske jednačine u kojima su nepoznate veličine koeficijenti  $a$  i  $b$ .

$$n \cdot a - b \cdot \sum_{i=1}^n t_i' = \sum_{i=1}^n \ln \Delta R_i \quad (6)$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n t_i'^2 - b \cdot \sum_{i=1}^n t_i' = \sum_{i=1}^n t_i' \cdot \ln \Delta R_i \quad (7)$$

Rešenja sistema jednačina data su izrazima:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n t_i'^2 \cdot \sum_{i=1}^n \ln \Delta R_i - \sum_{i=1}^n t_i' \cdot \sum_{i=1}^n t_i' \cdot \ln \Delta R_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i'^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i' \right)^2} \quad (8)$$

$$b = \frac{n \cdot a - \sum_{i=1}^n \ln \Delta R_i}{\sum_{i=1}^n t_i'} \quad (9)$$

Pomoću jednačina (8 i 9) mogu da se odrede porast električne otpornosti toplog namotaja  $\Delta R_u$  i vremenska konstanta zagrevanja namotaja  $T$ :

$$\Delta R_u = R_u - R_a = e^a, \quad T = \frac{1}{b} \quad (10)$$

Pomoću poznate vrednosti električne otpornosti namotaja  $R_a$  (dobijene na poznatoj temperaturi rashladnog ambijenta  $\vartheta_a$ ) i izračunate vrednosti porasta električne otpornosti toplog namotaja  $\Delta R_u$ , dobija se tražena ustaljena vrednost porasta temperature zagrevanja namotaja:

$$\theta_u = \vartheta_u - \vartheta_a = \frac{\Delta R_u}{R_a} (235 + \vartheta_a) = r \cdot e^a \quad (11)$$

### Uticaj veličine struje merenja električne otpornosti namotaja na tačnost određivanja ustaljene temperature namotaja $\theta_u$ i vremenske konstante zagrevanja namotaja $T$

Merenjem električne otpornosti namotaja koji se hladi (posle postizanja ustaljene temperature zagrevanja), namotaj se dodatno zagreva pod uticajem merne jednosmerne struje  $I_m$  (prisutne u kolu namotaja za vreme snimanja krive  $R(t)$ ), pa kriva hlađenja namotaja tokom merenja električne otpornosti odstupa od prirodne krive hlađenja, čiji parametri  $\theta_u$  i  $T$  treba da se odrede.

Dobijena kriva hlađenja namotaja  $\theta_{hl}(t)$  sadrži dve komponente: jednu čini prirodna kriva hlađenja namotaja  $\theta_h(t)$  a drugu kriva dopunskog zagrevanja namotaja  $\theta_z(t)$  usled prisustva merne struje  $I_m$ .

Posle određenog vremena, ogledom dobijena kriva

hlađenja namotaja  $\theta_{hl}(t)$  postiže ustaljeno stanje: porast temperature zagrevanja poprima vrednost  $\theta_{um} = \frac{P_{Cum}}{A} = \frac{RaIm^2}{A}$ . Kriva hlađenja namotaja  $\theta_{hl}(t)$  može da se predstavi sledećom jednačinom:

$$\theta_{hl}(t) = A e^{-\frac{t-t_x}{T}} + B \quad (12)$$

gde su:  $A = \theta_u \left( 1 - k e^{\frac{t_0}{T}} \right)$ ,  $B = \theta_{um}$

Merna struja  $I_m$  je višestruko manja od nazivne struje električne mašine  $I_n$  koja protiče kroz razmatrani namotaj u režimu zagrevanja električne mašine, pa se može definisati koeficijent "k" koji iskazuje relativni odnos ustaljenih vrednosti porasta temperature koje stvaraju struje  $I_m$  i  $I_n$ :

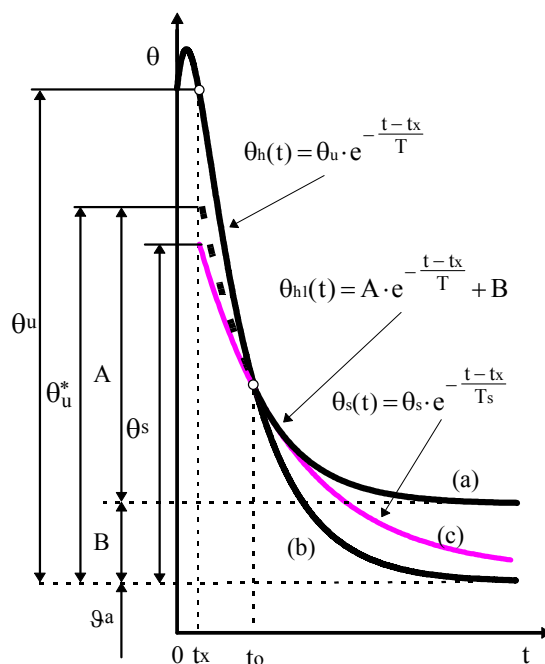
$$k = \frac{\theta_{um}}{\theta_u} = \frac{P_{Cum}}{P_{Cum}} = \frac{RaIm^2}{RuIn^2} \approx 0,75 \left( \frac{I_m}{I_n} \right)^2 \quad (13)$$

Odnos električnih otpornosti  $Ra/R_u$  u (13) iskazan je srednjom vrednošću ( $\approx 0,75$ ) odnosa temperatura rashladnog ambijenta  $\vartheta_a$  i ustaljene temperature namotaja  $\vartheta_u$ .

Koeficijent  $k$  je reda veličine  $k=0,01 \div 0,0001$  i poželjno je da bude što manji.

Prisustvo struje merenja  $I_m$  u namotaju dovodi do smanjenja strmine opadanja temperature krive hlađenja namotaja  $\theta_{hl}(t)$  u odnosu na prirodnu krivu hlađenja namotaja  $\theta_h(t)$  (krive (a) i (b) na sl.3), usled čega dolazi do greške u određivanju početne vrednosti porasta temperature zagrevanja namotaja. Umesto stvarne vrednosti  $\theta_u$ , ekstrapolacijom empirijski dobijene krive hlađenja  $\theta_{hl}(t)$  dobija se vrednost  $\theta_u^* = A + B$ , koja je uvek manja od stvarne vrednosti  $\theta_u$ .

Prisustvo struje  $I_m$  praktično ne utiče na promenu veličine vremenske konstante hlađenja namotaja.



Slika 3. Uticaj struje merenja električne otpornosti namotaja na tačnost određivanja ustaljene temperature namotaja

Prezentiranim postupkom numeričke ekstrapolacije, kriva  $\theta_n(t)$  (12), dobijena ogledom u vremenskom domenu  $t_o \leq t \leq t_n$ , aproksimira se krivom  $\theta_s(t)$  (kriva (c) na sl. 3):

$$\theta_s(t) = \theta_s e^{-\frac{t-t_x}{T_s}} \quad (14)$$

Parametri  $\theta_s$  i  $T_s$  su ocene parametara  $\theta_u$  i  $T$  stvarne krive hlađenja namotaja.

Ovim postupkom dolazi do daljeg uvećanja greške u određivanju ustaljene temperature zagrevanja namotaja.

Može se pokazati da ove greške zavise od:

- relativnog odnosa kvadrata struje merenja  $I_m$  i nazivne struje namotaja  $I_n$ , iskazanog preko koeficijenta  $k \approx 0,75 \left(\frac{I_m}{I_n}\right)^2$ ,
- relativnog vremena početka merenja električne otpornosti namotaja  $t_o^* = (t_o - t_x)/T$ ,
- relativnog vremena trajanja merenja električne otpornosti namotaja  $t_n^* = t_n'/T = (t_n - t_x)/T$  i
- relativne vrednosti vremenskog intervala sukcesivnog merenja električne otpornosti namotaja  $\Delta t_m^* = \Delta t_m/T$ .

Za primenjenu metodu numeričke ekstrapolacije nije neophodno merenje električne otpornosti namotaja vršiti u jednakim vremenskim intervalima, ali je uvođenjem parametra  $\Delta t_m$  (koji realno postoji pri primeni sistema za automatsku akviziciju podataka) olakšana analiza procentualne greške pri određivanju  $\theta_u$  i  $T$ . Pri tome je  $t_i = t_o + i \cdot \Delta t_m$ ,  $i=0, 1, 2, \dots, n-1$ .

U tabeli 1 predstavljene su teorijske procentualne greške u određivanju  $\theta_u$  i  $T$ , izračunate za različite vrednosti parametara:  $k=0,01$  i  $0,001$ ,  $t_o^* = 0,25$  do  $1,50$ ,  $t_n^* = 1$  do  $3$ ,  $\Delta t_m^* = 0,025$ ; pomoću sledećih izraza:

$$\Delta \theta_u [\%] = \frac{\theta_u - \theta_s}{\theta_u} 100 \quad \Delta T [\%] = \frac{T_s - T}{T} 100 \quad (15)$$

**Tabela 1.** Zavisnost procentualnih grešaka  $\Delta \theta_u$  i  $\Delta T$  od značajnih parametara

k	$t_o'/T$	$\Delta \theta_u$ [%]			$\Delta T$ [%]		
		$t_n' =$			$t_n' =$		
		1T	2T	3T	1T	2T	3T
0,01	0,25	0,54	1,46	3,90	1,92	3,36	6,07
	0,50	1,10	2,33	5,36	2,17	3,74	6,70
	0,75	1,80	3,40	7,18	2,46	4,19	7,43
	1,00	-	4,71	9,12	-	4,72	8,27
	1,25	-	6,32	1,53	-	5,33	9,25
0,001	0,25	0,06	0,15	0,43	0,19	0,33	0,61
	0,50	0,12	0,24	0,59	0,21	0,37	0,67
	0,75	0,20	0,35	0,79	0,24	0,41	0,74
	1,00	-	0,49	1,02	-	0,46	0,82
	1,25	-	0,66	1,30	-	0,52	0,91
	1,50	-	0,87	1,64	-	0,58	1,01

Iz table 1 proizlazi sledeće:

- a) koeficijent  $k$ , odnosno veličina struje merenja električne otpornosti namotaja  $I_m$ , značajno utiče na veličinu greške u određivanju veličina  $\theta_u$  i  $T$ . Procentualne greške  $\Delta \theta_u$  i  $\Delta T$  direktno su proporcionalne sa koeficijentom  $k$ . Za  $k =$

0,01 greške su za red veličine veće nego one za  $k = 0,001$ ;

b) povećanjem relativnog vremena početka merenja električne otpornosti namotaja  $t_o^*$ , razmatrane procentualne greške se povećavaju po parabolnoj krivi porasta;

c) produženjem vremena merenja električne otpornosti namotaja  $t_n'$  preko 2T razmatrane procentualne greške se značajno uvećavaju: približno se udvostručuju za svako naredno povećanje vrednosti  $t_n'$  u iznosu od 1T.

d) smanjenjem vremenskog intervala sukcesivnog merenja električne otpornosti namotaja  $\Delta t_m$  (uz nepromenjene ostale razmatrane parametre) uvećava se ukupni broj numeričkih podataka raspoloživih za obradu, i umanjuje (u manjoj meri) greška u određivanju veličina  $\theta_u$  i  $T$ .

Na osnovu izvršene analize uticaja parametara od značaja za veličinu procentualnih grešaka ustaljene vrednosti porasta temperature zagrevanja  $\theta_u$  i vremenske konstante zagrevanja  $T$ , proizlazi da optimalni uslovi za određivanje ovih veličina mogu da se ostvare u sledećim okolnostima:

- za veličinu parametra  $k \leq 0,001$ , što odgovara veličini struje merenja reda veličine  $I_m \leq 0,04 I_n$ ,
- za veličinu vremena početka merenja električne otpornosti namotaja  $t_o' \leq 0,5T$  (što i za električne mašine sa malom vremenskom konstantom zagrevanja, reda  $\approx 2$  min, nije teško ostvariv uslov),
- za ukupno vreme sukcesivnog merenja električne otpornosti namotaja  $t_n' \leq 2T$ , uz interval merenja  $\approx 0,25$  min.

U ovim uslovima teorijske procentualne greške u određivanju veličina  $\theta_u$  i  $T$  kreću se u granicama do 0,25 %, odnosno do 0,40 %, u odnosu na njihove stvarne vrednosti.

Pored razmatrane teorijske greške uslovljene karakterom primenjene metode ispitivanja, postoje i empirijske greške: subjektivne i objektivne - uslovljene metrološkim karakteristikama merne opreme, kvalitetom organizacije ispitivanja, i drugim faktorima.

Kako se najveće dozvoljene vrednosti porasta temperature zagrevanja namotaja kreću u granicama od 60 K do 135 K (klase izolacije namotaja A do H), to se ukupna teorijska i empirijska greška u određivanju  $\theta_u$  reda 1% može se smatrati greškom u tolerantnim granicama. Na osnovu ovog kriterijuma tačnosti određivanja  $\theta_u$ , poželjno je da teorijska (sistematska) greška primenjene metode bude što manja, jer je lakše uticati na nju, nego na deo ukupne greške uslovljen empirijskim faktorima.

Na osnovu činjenice da je struja merenja električne otpornosti namotaja  $I_m$  faktor sa najznačajnijim uticajem na veličinu razmatranih sistematskih grešaka, to bi njenim smanjenjem, na primer, na veličinu  $I_m \leq 1\%$  od  $I_n$  ( $k \approx 0,0001$ ), došlo do smanjenja greške u određivanju  $\theta_u$  za red veličine u odnosu na onu za  $k = 0,001$ . Ovu činjenicu treba koristiti u praksi ispitivanja zagrevanja namotaja električnih mašina, naročito mašina većih snaga kod kojih je ovaj uslov lako ostvariv.

Namotaji električnih mašina većih snaga imaju veliku električnu vremensku konstantu ( $L/R$ ), usled čega dolazi do izrazite prelazne pojave uspostavljanja merne struje  $I_m$ , pa treba voditi računa o skraćanju vremena stabilizacije merne struje.

### Numerički primer

Primena postupka numeričke ekstrapolacije proverena je na većem broju asinhronih motora snaga do 1,5 kW i sinhronih generatora snaga do 40 kVA. Dobijeni su očekivani, zadovoljavajući rezultati. Uspešnost primene postupka numeričke ekstrapolacije krive hlađenja namotaja nije uslovljena nazivnom snagom električne mašine.

Primena predloženog postupka numeričke ekstrapolacije krive hlađenja namotaja električne mašine prezentiraće se na primeru oglada zagrevanja trofaznog asinhronog motora sa kaveznim rotorom, sledećih nazivnih karakteristika:  $U_n=3 \times 380\text{V}$ ,  $50\text{Hz}$ ;  $P_n=0,18\text{ kW}$ ;  $I_n=0,88\text{A}$ ;  $\cos\varphi=0,7$ ;  $n=1450\text{ min}^{-1}$ .

Na temperaturi rashladnog vazduha  $\vartheta_a=18,1^\circ\text{C}$  statorski namotaj motora imao je električnu otpornost  $R_a=48,61\Omega$ .

U toku oglada zagrevanja, asinhroni motor je bio priključen na nazivni napon napajanja i opterećen konstantnom snagom. Kako bi snaga gubitaka u namotaju statora bila konstantna u toku oglada, aktivna snaga koju je motor uzimao iz mreže ( $P_1=140\text{ W}$ ) takođe je održavana konstantnom.

Kada je temperatura kućišta asinhronog motora dostigla ustaljenu vrednost ( $\vartheta_k=36,5^\circ\text{C}$ ), motor je isključen iz mreže i zaustavljen. Zatim je na krajeve statorskog namotaja priključen unapred pripremljeni uređaj za sukcesivno merenje električne otpornosti namotaja U/I metodom.

Prva izmerena vrednost električne otpornosti namotaja dobijena je u vremenu od 30 s od trenutka isključenja motora sa električne mreže. Tokom 8 min vršeno je merenje električne otpornosti namotaja u intervalima merenja  $\Delta t_m=10\text{ s}$ . Struja merenja električne otpornosti u toku oglada hlađenja imala je konstantnu vrednost  $I_m=1,0\text{ mA}$ . U toku oglada zagrevanja, struja u statorskom namotaju je imala vrednost  $I_1=0,3\text{ A}$ , a koeficijent  $k$  vrednost  $k \approx 0,75$  ( $I_m/I_1$ ) $^2 \approx 10^{-5}$ .

U toku oglada zagrevanja i hlađenja temperatura ambijenta je imala male oscilacije, reda  $0,5^\circ\text{C}$  oko srednje vrednosti  $18,1^\circ\text{C}$ .

Ogledom hlađenja asinhronog motora dobijena je kriva promene električne otpornosti statorskog namotaja  $R(t)$  na temperaturi ambijenta  $\vartheta_a=18,1^\circ\text{C}$  (dijagram sl.4 a)).

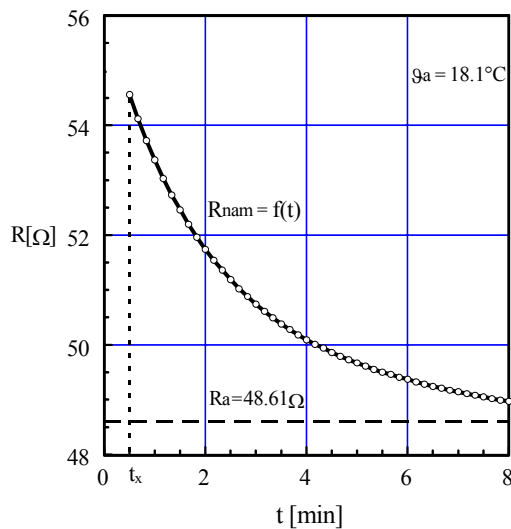
Na dijagramu sl.4b), predstavljen je logaritam krive promene električne otpornosti namotaja  $\ln \Delta R(t) = \ln(R(t)-R_a)$ .

Prva izmerena vrednost električne otpornosti namotaja dobijena u vremenu 30 s od početka hlađenja namotaja,  $R_u=54,79\ \Omega$  shodno standardu [1], odgovara ustaljenoj temperaturi namotaja  $\vartheta_u=50,28^\circ\text{C}$ . Za ustaljenu vrednost porasta temperature zagrevanja namotaja dobijena je vrednost  $\theta_u=32,18\text{ K}$ , a za vremensku konstantu zagrevanja namotaja vrednost  $T=2,38\text{ min}$ .

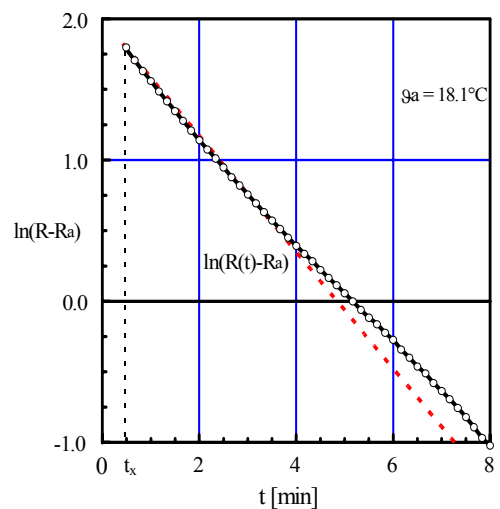
Kako je ovim ogledom  $t_0 \leq t_x$ , nije bilo potrebno snimati krivu promene električne otpornosti statorskog namotaja. To je učinjeno da bi se istražila primenljivost prezentirane metode numeričke ekstrapolacije krive  $\Delta R(t)$  za određivanje veličina  $\theta_u$  i  $T$  u slučajevima kada je vreme  $t_0$  do prve izmerene vrednosti električne otpornosti namotaja veće od  $t_x=30\text{ s}$ . Varirano je vreme  $t_0$ , odnosno  $t'_0 = t_0 - t_x$  i za svako od njih uz konstantnu vrednost vremena  $t'_n = t_n - t_x = 7,5\text{ min}$ , izvršeno je niz sukcesivnih izračunavanja ustaljene vrednosti porasta temperature zagrevanja  $\theta_u$  i vremenske konstante zagrevanja  $T$ .

Na sl.5 je predstavljena kriva promene porasta temperature namotaja  $\theta_{nam}=f(t)$  (kriva hlađenja namotaja), dobi-

jena transformacijom krive  $R(t)$  pomoću (3), i krive ocene (krive estimacije) ustaljene vrednosti porasta temperature zagrevanja namotaja  $\theta_u=f(t)$  i vremenske konstante zagrevanja namotaja  $T=f(t)$ , za različita vremena  $t'_0$  (10s, 20s, 30s,...) za koja je vršeno sukcesivno izračunavanje, odnosno procena veličina  $\theta_u$  i  $T$ .

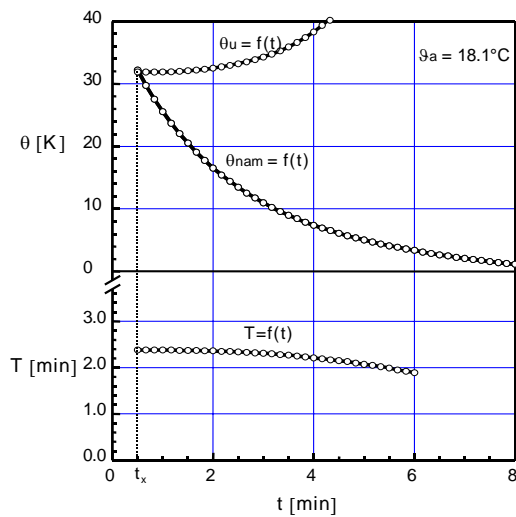


a)



b)

Slika 4. Kriva promene električne otpornosti statorskog namotaja  $R(t)$  u toku oglada hlađenja (a) i njen logaritam (b)

Slika 5. Krive ocene veličina  $\theta_u$  i  $T$ 

U tabeli 2 su predstavljene izračunate ukupne procentualne greške u oceni  $\theta_u$  i  $T$  za različite vrednosti relativnog vremena početka "merenja električne otpornosti namotaja" (u konkretnom slučaju: početka izračunavanja veličine koja se procenjuje).

Tabela 2. Procentualne greške u oceni  $\theta_u$  i  $T$ 

$\frac{t_o}{T}$	$\Delta\theta_u$ [%]	$\Delta T$ [%]
0,25	0,87	0,00
0,50	0,10	0,42
0,75	2,36	1,26
1,00	5,28	2,52
1,25	11,56	4,62
1,50	19,00	7,14

teorijskim (sistematskim) greškama primenjene metode, predstavljenim u tabeli 1, nisu posledica grubih grešaka oglada zagrevanja asinhronog motora, već posledica znatnog odstupanja ogledom dobijene krive hlađenja namotaja od one očekivane prema usvojenom modelu namotaja predstavljenog termički kao jednorodno, homogeno telo. To je očigledno na dijagramu na sl.4 b) na kome logaritmom ogledom dobijene krive hlađenja u određenom domenu (posle  $t_m > 4$  min) znatno odstupa od očekivane prave linije. U procesu razmene toplotne energije namotaja i rashladnog ambijenta, aktivno učestvuju i magnetno jezgro statora i kućište statora, što ukazuje na činjenicu da posmatrani proces zagrevanja i hlađenja namotaja treba razmatrati kao proces razmene toplotne

energije složenog tela, sačinjenog od više elementarnih homogenih tela.

Procentualne greške iz tabele 2 mogu se smanjiti skraćanjem oglada hlađenja namotaja: do vremena  $t'_n \leq 3.0 \text{ min} \approx 1.25T$ , čime se izbegava oblast izrazite nelinearnosti krive  $\ln(R(t)-Ra)$  (slika 4b)).

### Zaključak

Prezentirana metoda numeričke ekstrapolacije krive hlađenja, zasnovana na primeni principa najmanjih kvadrata, u praksi daje dobre rezultate jer otklanja niz subjektivnih grešaka u određivanju ustaljene vrednosti porasta temperature zagrevanja  $\theta_u$  koje su nužno prisutne pri primeni grafičke ekstrapolacije.

Analizom teorijske (sistematske) procentualne greške primenjene metode promene električne otpornosti namotaja u određivanju ustaljene vrednosti porasta temperature zagrevanja  $\theta_u$  i vremenske konstante zagrevanja namotaja  $T$ , utvrđeni su faktori sa značajnim uticajem na veličinu greške u određivanju  $\theta_u$  i  $T$ . Optimalnim izborom uslova u kojima se sprovodi ogled hlađenja namotaja: (a) izborom veličine struje  $I_m$  kojom je  $k \leq 0.001$ , (b) dobro planiranom organizacijom ispitivanja, tako da je  $t'_o \leq 0.5T$ , (c) trajanje oglada hlađenja  $t'_n \approx (1.5 \pm 0.2)T$ , (d) izborom intervala merenja  $\Delta t_m$ , ne dužim od  $T/10$ ; moguće je ograničiti ukupnu (teorijsku i empirijsku) procentualnu grešku u određivanju veličina  $\theta_u$  i  $T$  u granicama ispod 1%. To bi u uslovima kada se očekuju najviše vrednosti porasta temperature zagrevanja od  $\theta_u = 135$  K (klasa izolacije namotaja H) ukupna apsolutna greška u određivanju  $\theta_u$  bila u granicama  $\approx 1$  K, što bi se moglo smatrati prihvatljivom greškom.

### Literatura

- [1] Standard IEC 34-1, *Rotating electrical machines*, Part1: Rating and performance, 1996.
- [2] Standard JUS IEC 60034-1, *Rotacione električne mašine, Deo 1: Naznačene karakteristike i pogonske karakteristike*, 1998.
- [3] Standard GOST 11828-86, *Mašini električeskie vraščajušcisja, Obščie metodi ispitanija*, 1986.
- [4] GOTTER, G. *Nagrevanie i ohlaždenie električeskih mašin* (ruski prevod sa nemačkog). Gosenergoizdat, 1961.
- [5] KOSTENKO, M.P., PIOTROVSKI, L.M. *Električeskie mašini*. čast II, Energia, Leningrad, 1969.

Rad primljen: 21.6.2000.god.