

Tomasz MNICH  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

## WYKORZYSTANIE METODY ZASTĘPCZEGO SCHEMATU CIEPLNEGO DO IDENTYFIKACJI ZMIAN REZYSTANCJI KLATKI WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO, W STANACH USTALONYCH I NIEUSTALONYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono układ identyfikacji zmian rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego, zbudowany w oparciu o metodę zastępczych schematów cieplnych. Układ identyfikuje zmiany rezystancji klatki wirnika silnika pod wpływem zmian temperatury w wirniku, w stanie ustalonym i nieustalonym. Układ uwzględnia wpływ wszystkich strat w maszynie na temperaturę klatki wirnika. Identyfikacja jest przeprowadzana na podstawie łatwo mierzalnych wielkości w maszynie, takich jak prąd i napięcie stojana.

## APPLICATION OF THERMAL EQUIVALENT NETWORK TO IDENTIFICATION OF INDUCTION MOTOR SQUIRREL CAGE RESISTANCE BOTH IN STEADY AND DYNAMIC STATE

**Summary.** The paper presents a system for identification of resistance changes of an induction motor squirrel cage. The system was built on the basis of the thermal equivalent diagram method. The system identifies change in the resistance of the motor squirrel cage basing on temperature changes in a rotor, both in steady and transient state. The system takes into consideration the influence of the majority of losses in a machine on the squirrel cage temperature. The identification is carried out on the basis of measurable quantities such as stator current and voltage.

### 1. WPROWADZENIE

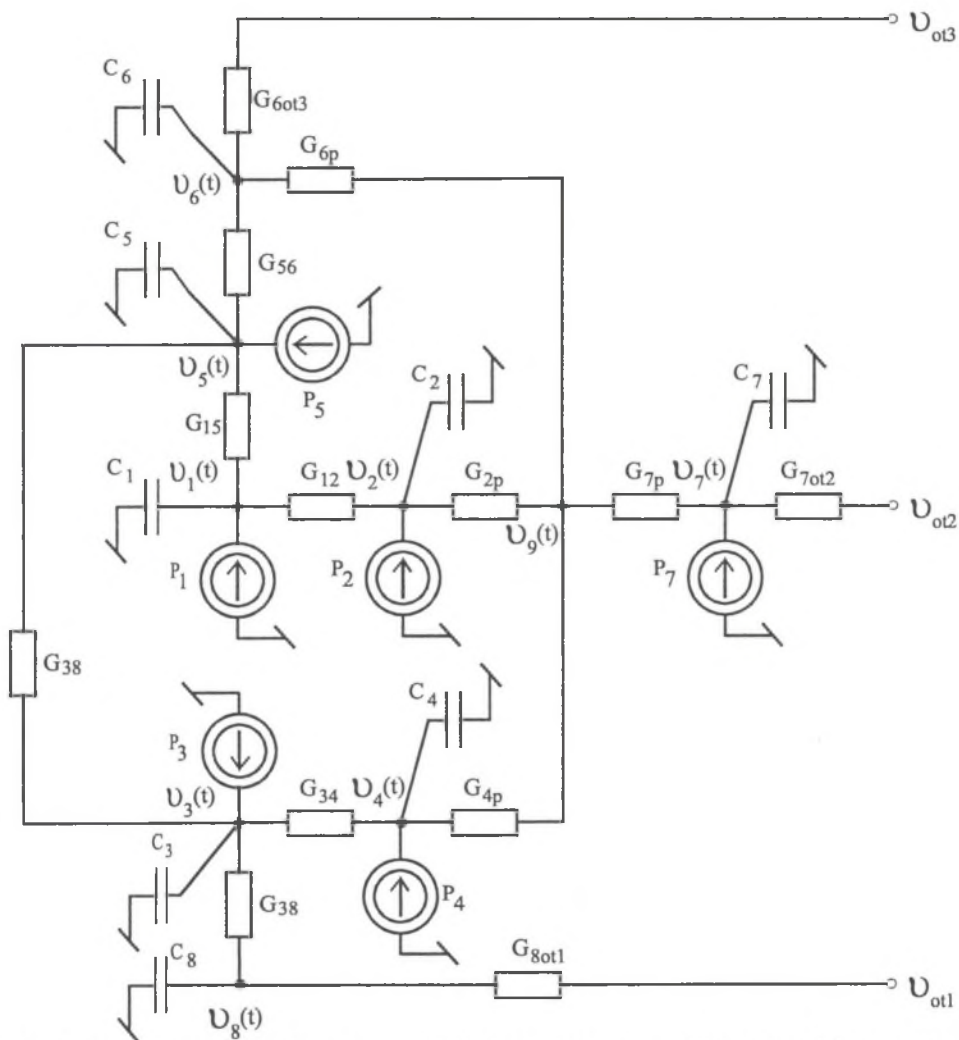
Nowoczesne układy napędowe z silnikami indukcyjnymi są bardzo szeroko stosowane w przemyśle, skutecznie wypierając silniki prądu stałego. Dzięki opracowaniu wielu algorytmów sterowania dynamika i właściwości regulacyjne silników indukcyjnych dorównują, a często przewyższają właściwości silników prądu stałego, przewyższając je również trwałością. Przykładem mogą tu być algorytmy sterowania wektorowego, bardzo szeroko wykorzystywane w sterowaniu maszyn indukcyjnych.

Od układu sterowania wymaga się, aby właściwości regulacyjne silników były jak najlepsze oraz aby w maksymalny sposób wykorzystywały możliwości maszyny. Aby układ sterowania zapewniał dobre właściwości regulacyjne, musi otrzymywać informacje o parametrach elektromagnetycznych maszyny, takich jak indukcyjności i rezystancje uzwojeń maszyny, którą steruje. Jednak układy te mogą identyfikować wielkości elektromagnetyczne maszyny podczas postoju, przeważnie przed pierwszym uruchomieniem. Powoduje to,

że układ sterowania nie ma informacji o rzeczywistej wartości parametrów elektromagnetycznych w trakcie pracy, ponieważ nie uwzględnia on ich zmian spowodowanych między innymi przez zmiany termiczne w samych uzwojeniach. Ma to szczególne znaczenie, jeśli układ sterowania ma zapewnić dużą dokładność regulacji, przy częstych zmianach obciążenia. Wówczas stan nagrzania uzwojeń ciągle się zmienia, a wraz z nim i same parametry. Z uwagi na to, szczególnie dużego znaczenia nabierają te metody, które są w stanie identyfikować zmiany parametrów elektromagnetycznych w trakcie pracy maszyny, a które nie wymagają instalowania żadnych dodatkowych czujników. W artykule zostanie przedstawiona metoda identyfikacji zmian rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego w trakcie pracy ustalonej oraz w stanach dynamicznych.

## 2. METODA OKREŚLENIA REZYSTANCJI KLATKI WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO W TRAKCIE PRACY

Określanie rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego jest sprawą dość złożoną, z uwagi na to, że nie ma bezpośredniego dostępu do obwodu wirnika. Sposób, którym się posłużono w celu jej wyznaczenia, bazuje na modelu cieplnym, zbudowanym w oparciu o metodę zastępczego schematu cieplnego silnika indukcyjnego. Wykorzystanie tej metody wydaje się celowe, z uwagi na to, że znając rozkład temperatury w maszynie indukcyjnej, a szczególnie w samym wirniku, można obliczyć zmiany rezystancji wirnika. Jednak zbudowanie modelu cieplnego samej klatki może wносить dość duże błędy, gdyż temperatura w wirniku zmienia się nie tylko na skutek strat cieplnych w uzwojeniach wirnika, lecz również jest ona zależna od pozostałych strat w maszynie, takich jak straty w uzwojeniach i pakiecie stojana, oraz temperatury otoczenia itp. Aby ustrzec się powyższych błędów, posłużono się zastępczym schematem cieplnym całego silnika indukcyjnego budowy zamkniętej, w którym poszczególne węzły cieplne odpowiadają temperaturom średnim poszczególnych elementów maszyny (rys. 1) [3].



Rys.1. Zastępczy schemat cieplny silnika indukcyjnego budowy zamkniętej do obliczeń w stanie ustalonym i niestalonym

Fig. 1. Thermal equivalent diagram of induction motor for calculations in steady and transient state

gdzie:  $u_1(t)$  - średnia temperatura części żłobkowej uzwojenia stojana;

$u_2(t)$  - średnia temperatura części czołowej uzwojenia stojana;

$u_3(t)$  - średnia temperatura prętów klatki wirnika;

$u_4(t)$  - średnia temperatura pierścieni zwierających klatkę wirnika;

$u_5(t)$  - średnia temperatura pakietu blach stojana;

$u_6(t)$  - średnia temperatura kadłuba;

$u_7(t)$  - średnia temperatura tarcz łożyskowych;

$u_8(t)$  - średnia temperatura wału i pakietu wirnika;

$u_9(t)$  - średnia temperatura powietrza wewnątrz silnika;

$u_{ot1}, u_{ot2}, u_{ot3}$  - temperatura powietrza na zewnątrz silnika;

$G_{x,y}$  - przewodności cieplne pomiędzy poszczególnymi węzłami cieplnymi  $x$  i  $y$ .

są wielkościami wyznaczonymi w dowolnej chwili czasu  $t$

W celu opracowania modelu cieplnego maszyny przyjęto następujące założenia upraszczające:

- wszystkie przewodności cieplne  $G_{x,y}$  mają stałą wartość, niezależną od temperatury poszczególnych elementów maszyny oraz od temperatury zewnętrznej,
- temperatura otoczenia pozostaje stała,
- pominięto zmiany prędkości obrotowej silnika, jakie powstają np. przy zmianie obciążenia,
- straty powstające w pakiecie blach stojana  $P_7$  oraz w łożyskach  $P_8$  nie zależą od ich temperatury.

Przewodności cieplne oraz straty mocy czynnej w poszczególnych elementach maszyny, zaznaczone na schemacie, są obliczane na podstawie danych konstrukcyjnych maszyny. Wszystkie zależności podane są w pracy [1].

Model cieplny uwzględnia zależność strat generowanych w poszczególnych fragmentach uzwojeń w zależności od ich temperatury [1, 2, 3]:

$$P_k(t) = P_{k0}(1 + \alpha_{mk} U_k(t)), \quad k=1...4, \quad (1)$$

gdzie:

- $P_k(t)$  - straty mocy generowane w k-tym elemencie uzwojenia w temperaturze  $U_k(t)$  °C;
- $P_{k0}$  - straty generowane w k-tym elemencie uzwojenia w temperaturze 0°C;
- $\alpha_{mk}$  - temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji materiału, z którego jest wykonany k-ty element uzwojenia;
- $U_k(t)$  - średnia temperatura k-tego elementu maszyny w chwili t.

Wartości poszczególnych pojemności cieplnych zostały obliczone z zależności [3]:

$$C_k = c_k m_k \frac{J}{k} \quad k=1...9, \quad (2)$$

- gdzie:  $c_k$  - ciepło właściwe materiału, z którego został wykonany k-ty element maszyny;
- $m_k$  - masa k-tego elementu.

Na podstawie schematu cieplnego silnika indukcyjnego z rys.1 sformułowano układ równań różniczkowych dla stanu cieplnie niestabilnego [3]:

$$C \cdot \frac{d\mathbf{U}_k(t)}{dt} + \mathbf{G}\mathbf{U} = \mathbf{P}, \quad (3)$$

- gdzie:  $C$  - diagonalna macierz pojemności cieplnych poszczególnych elementów silnika;
- $\mathbf{U}_k(t)$  - wektor przebiegów czasowych średnich temperatur poszczególnych elementów silnika;
- $\mathbf{G}$  - macierz przewodności cieplnych;
- $\mathbf{P}$  - wektor strat generowanych w poszczególnych elementach silnika;
- $t$  - czas.

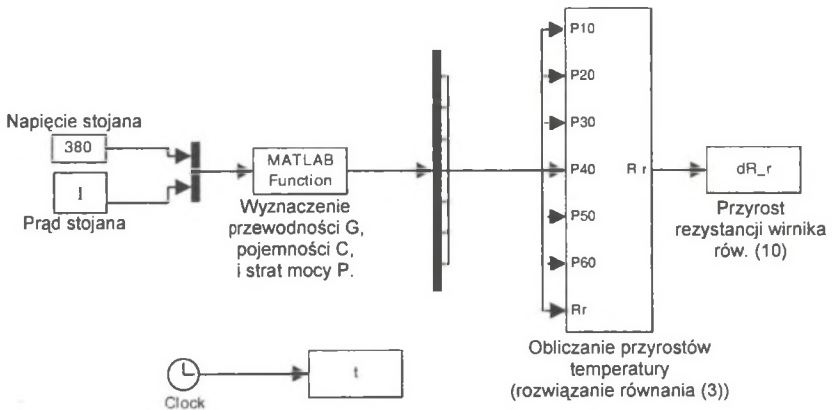
Powyższy model posłużył do wyznaczania zmian temperatury klatki wirnika silnika indukcyjnego w trakcie jego pracy, na podstawie których obliczono przyrosty rezystancji. Rozwiązaniem układu równań (3) są przebiegi czasowe średnich temperatur w poszczególnych elementach maszyny. Przeprowadzono obliczenia dla stanu ustalonego i niestabilnego. Dla stanu ustalonego nie występują zmiany temperatury, zatem:

$$C \frac{d\mathbf{U}_k(t)}{dt} = 0. \quad (4)$$

Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu programów Matlab oraz Matlab Simulink. Do rozwiązania układu równań różniczkowych (3) zastosowano metodę Rungego-Kutty czwartego rzędu. Do obliczeń przyjęto, dotyczące silnika indukcyjnego, o danych znamionowych:  $P_N=3$  kW,  $U_N=220/380$  V,  $I_N=11.3/6.5$  A,  $n_N=1430$  obr/min.

### 3. OKREŚLANIE PRZYROSTU REZYSTANCJI KLATKI WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO W STANIE USTALONYM

W celu określenia zmian rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego wykorzystano schemat z rys. 2 w którym uwzględniono równanie (4).



Rys. 2. Schemat układu zbudowanego w środowisku Matlab Simulink określającego przyrosty rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego

Fig. 2. Schematic diagram of the circuit built in Matlab Simulink determining rises in resistance of induction motor squirrel cage

W stanie cieplnie ustalonym maszyna jest już nagrzana i nie występują żadne zmiany temperatury. W takim przypadku, aby obliczyć średnie temperatury ustalone w poszczególnych elementach maszyny (w tym również w wirniku), należy rozwiązać liniowy układ równań, zapisany w postaci macierzowej [1]:

$$GU = P_e \quad (5)$$

Rezystancja klatki wirnika w temperaturze 20°C została obliczona na podstawie zależności [2]:

$$R_r = R_p + 2 R_{pzw} \Omega \quad (6)$$

gdzie:

$R_p$  - rezystancja pojedynczego pręta klatki wirnika  $\Omega$  [1] obliczona na podstawie parametrów konstrukcyjnych,

$R_{pzw}$  - rezystancja pierścienia zwierającego  $\Omega$  [1] obliczona na podstawie parametrów konstrukcyjnych.

Przy obliczaniu rezystancji klatki wirnika pominięto wpływ wypierania prądu. Przyjęto takie założenie z uwagi na to, że wirnik obraca się z prędkością znamionową oraz moc silnika jest niewielka.

Zmiana rezystancji spowodowana zmianą temperatury klatki wirnika została obliczona z zależności:

$$\Delta R_u = R_{ru} - R_{rw} \Omega \quad (7)$$

$$R_{ru} = R_r (1 + \alpha_{Al} \cdot \Delta v_u) \Omega \quad (8)$$

gdzie:

$\alpha_{Al}$  - temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji materiału, z którego wykonane jest uzwojenie wirnika;

$\Delta v_u$  - przyrost temperatury klatki wirnika.

Z uwagi na to, że średnia temperatura prętów wirnika  $v_3(t)$  oraz średnia temperatura pierścieni zwierających  $v_4(t)$  są prawie jednakowe, do obliczania zmian rezystancji wykorzystano średnią temperaturę prętów wirnika  $v_3(t)$ .

Rozwiązując układ równań (5), otrzymano wartości średnich temperatur silnika indukcyjnego, dla trzech przypadków, gdy silnik był obciążony znamionowo  $I_N$  i przeciążony prądami  $1,3 I_N$  oraz  $1,5 I_N$ . Na podstawie przyrostów temperatury klatki wirnika wyznaczono wartości rezystancji przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie przyrostów temperatury i rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego w zależności od prądu stojana

Prąd stojana $I = I_N$	Prąd stojana $I = 1,3 I_N$	Prąd stojana $I = 1,5 I_N$
Rezystancja klatki wirnika w temperaturze 20°C		$R_r = 0,00117 \Omega$
Przyrost temperatury klatki wirnika $v_u = 77,6 \text{ K}$	Przyrost temperatury klatki wirnika $v_u = 101,6 \text{ K}$	Przyrost temperatury klatki wirnika $v_u = 126 \text{ K}$
Rezystancja klatki wirnika dla temperatury ustalonej: $\Delta R_{ru} = 0,000336 \Omega$	Rezystancja klatki wirnika dla temperatury ustalonej: $\Delta R_{ru} = 0,000437 \Omega$	Rezystancja klatki wirnika dla temperatury ustalonej: $\Delta R_{ru} = 0,000545 \Omega$

Na podstawie powyższych wartości można stwierdzić, że występują znaczne różnice między rezystancją wirnika w temperaturze otoczenia a rezystancją obliczoną dla stanu obciążenia. Różnica sięga od 28% do 46%. Układ sterowania, który przebieg strumienia odtwarza w oparciu o rezystancję klatki wirnika wyznaczoną w temperaturze 20°C i nie uwzględnia jej zmiany w trakcie pracy maszyny, pogorszy swoje właściwości regulacyjne.

#### 4. OKREŚLANIE PRZYROSTU REZYSTANCJI KLATKI WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO W STANACH DYNAMICZNYCH

W celu określenia przyrostu rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego w stanach dynamicznych, również wykorzystano układ przedstawiony na rysunku 2. Schemat ten składa się z trzech głównych elementów. Pierwszym elementem jest blok „Matlab Function”, w którym wyznaczane są przewodności cieplne  $G_{xy}$  pomiędzy poszczególnymi elementami maszyny, pojemności cieplne  $C_k$  poszczególnych fragmentów maszyny oraz straty mocy  $P_k(t)$  generowane w k-tym fragmencie uzwojenia w temperaturze  $v_k(t)$ . Kolejnym elementem jest blok, którego zadaniem jest rozwiązanie równania (3) i w efekcie określenie przyrostu temperatury klatki wirnika. W schemacie z rys.1, na podstawie którego sporządzono układ równań (3), są uwzględnione również inne straty w maszynie indukcyjnej, mające wpływ na stan nagrzania wirnika silnika indukcyjnego. Ostatni blok służy do obliczania przyrostu

rezystancji wirnika na podstawie przyrostów temperatury. W celu obliczenia przyrostu rezystancji wykorzystano równania:

$$\Delta R_r(t) = R_r(t) - R_r \Omega \quad (9)$$

$$R_r(t) = R_r \cdot (1 + \alpha_{Al} \nu(t)) \Omega \quad (10)$$

gdzie:

- $\Delta R_r(t)$  - przyrost rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego w dowolnej chwili czasu  $t$ ;
- $R_r(t)$  - średnia wartość rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego w dowolnej chwili czasu  $t$ ;
- $R_r$  - rezystancja klatki wirnika silnika indukcyjnego w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  na podstawie równania (6);
- $\nu(t)$  - średnia wartość przyrostu temperatury klatki wirnika silnika indukcyjnego w dowolnej chwili czasu  $t$ .

W równaniu (10) przyjęto taką samą temperaturę dla prętów klatki wirnika oraz dla pierścieni zwierających. Różnica między tymi temperaturami w dowolnej chwili czasu nie przekracza 2 K.

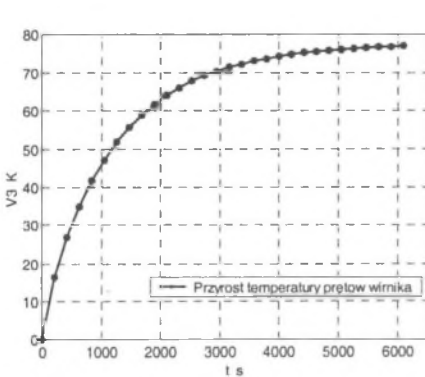
Przeprowadzono badania symulacyjne dla następujących przypadków pracy maszyny:

- a) długi czas pracy (dłuższy niż zastępcza ciepła stała czasowa maszyny) prądzie  $I_N$ ;
- b) długi czas pracy przy przeciążeniu prądem  $1,3 I_N$ ;
- c) praca ze zmiennym momentem obciążającym (zmiana wartości prądu stojana z wartości  $1,3 I_N$  do wartości  $I_N$  i następnie ponowne zwiększenie prądu do  $1,5 I_N$ ).

We wszystkich tych przypadkach przyjęto, że temperatura otoczenia pozostaje stała w trakcie jednego cyklu obliczeniowego.

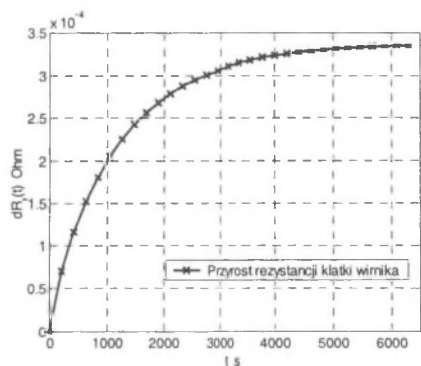
Na podstawie badań symulacyjnym przeprowadzonych przy użyciu programu komputerowego Matlab Simulink otrzymano następujące wyniki.

Dla przypadku a)



Rys. 3. Przyrost temperatury klatki wirnika silnika indukcyjnego w czasie pracy od  $t=0$  do  $t=6500$  s i prądu znamionowego  $I_N$

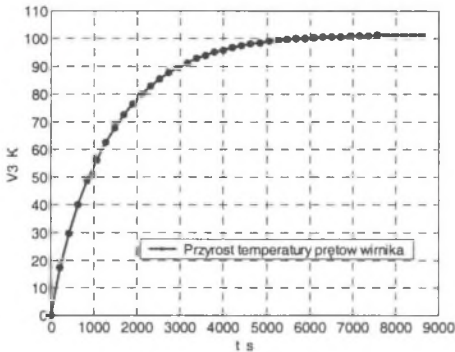
Fig. 3. Temperature rise of induction motor squirrel cage and rotor resistance for operation time for  $t=0$  to  $t=6500$  s and rated current  $I_N$



Rys. 4. Przyrost rezystancji wirnika silnika indukcyjnego w czasie pracy od  $t=0$  do  $t=6500$  s i prądu znamionowego  $I_N$

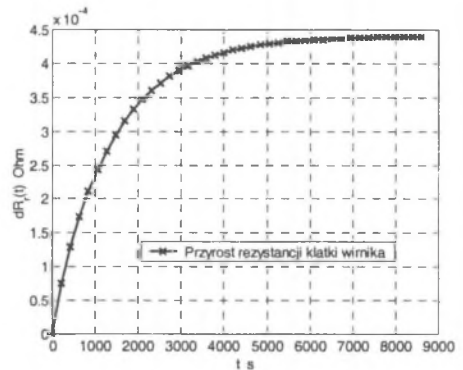
Fig. 4. Resistance rise of induction motor for operation time for  $t=0$  to  $t=6500$  s and rated current  $I_N$

Dla przypadku b)



Rys. 5. Przyrost temperatury klatki wirnika silnika indukcyjnego w czasie pracy od  $t=0$  do  $t=9000$  s i przeciążeniu prądem  $1,3 I_N$

Fig. 5. Temperature rise of induction motor squirrel cage and rotor resistance for operation time for  $t=0$  to  $t=9000$  s and overload current  $1,3 I_N$

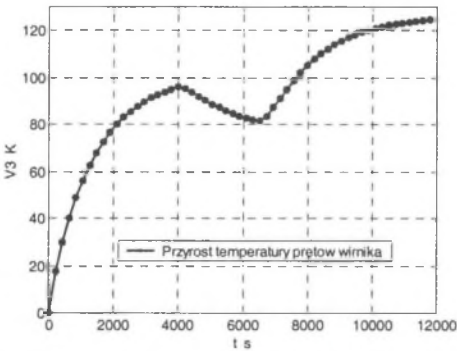


Rys. 6. Przyrost rezystancji wirnika silnika indukcyjnego w czasie pracy od  $t=0$  do  $t=9000$  s i przeciążeniu prądem  $1,3 I_N$

Fig. 6. Resistance rise of induction motor rotor for operation time for  $t=0$  to  $t=9000$  s and overload current  $1,3 I_N$

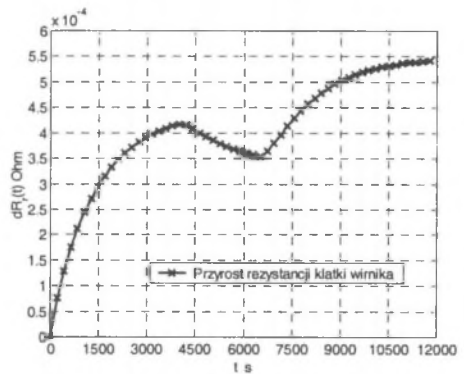
Na podstawie otrzymanych przebiegów można stwierdzić, że rezystancja klatki wirnika silnika indukcyjnego nie ma wartości stałej, lecz jej zmiany są dość znaczne. W przypadku pierwszym, gdy silnik pracował przy obciążeniu znamionowym, jej wartość wzrosła od 0 do 28% wartości silnika przed uruchomieniem. Znacznie większy przyrost otrzymano, gdy silnik pracował przy przeciążeniu rzędu  $1,3 I_N$  do 37%. W obu przypadkach można zaobserwować dość znaczny przyrost rezystancji klatki wirnika, co ma duże znaczenie praktyczne dla układów sterowania maszynami, które do identyfikacji niektórych wielkości potrzebnych do regulacji wymagają precyzyjnego określenia parametrów maszyny. Rezystancja wirnika jest tu dość ważnym parametrem, szczególnie przy odtwarzaniu strumienia wirnika [3].

Dla przypadku c)



Rys. 7. Przyrost temperatury klatki wirnika silnika indukcyjnego przy zmianie wartości prądu stojana z wartości  $1,3 I_N$  do wartości  $I_N$  i następnie ponowne zwiększenie prądu do  $1,5 I_N$  (praca ze zmiennym momentem obciążającym)

Fig. 7. Temperature rise of induction motor squirrel cage and rotor resistance when decreasing stator current from  $1,3 I_N$  to  $I_N$  and increasing again to  $1,5 I_N$  (work at variable load)



Rys. 8. Przyrost rezystancji klatki wirnika przy zmianie wartości prądu stojana z wartości  $1,3 I_N$  do wartości  $I_N$  i następnie ponowne zwiększenie prądu do  $1,5 I_N$  (praca ze zmiennym momentem obciążającym)

Fig. 8. Resistance rise of squirrel cage when decreasing stator current from  $1,3 I_N$  to  $I_N$  increasing again to  $1,5 I_N$  (work at variable load)



Na podstawie przyrostu rezystancji można stwierdzić, że zmiana warunków pracy polegająca na odciążeniu silnika powoduje częściowe zmniejszenie rezystancji wirnika. Jednak ponowne zwiększenie obciążenia do  $1,5 I_N$  sprawia, że rezystancja wzrasta bardziej. Dzieje się tak na skutek tego, że klatka wirnika była już wstępnie nagrzana. Na podstawie powyższych badań symulacyjnych można stwierdzić, że przyjęta do obliczeń metoda zastępczych schematów cieplnych daje przewagę nad różnego rodzaju estymatorami. Model opracowany na potrzeby identyfikacji uwzględnia nie tylko wstępne nagrzanie klatki wirnika, ale również wpływ innych nagrzaných elementów maszyny, takich jak rdzeń stojana, uzwojenia stojana, kadłub, powietrze w środku maszyny. Układ regulacji, który pracowałby w takich warunkach, wymaga albo złożonych regulatorów – np. adaptacyjnych, lub sprzężenia zwrotnego od prędkości wirnika. Sprzężenie to powoduje, że identyfikacja strumienia wirnika staje się łatwiejsza, ponieważ w cyklu obliczeniowym nie jest wymagana dodatkowo estymacja prędkości wirnika [4], [5]. Jednak nie w każdym układzie można zastosować tego typu sprzężenie zwrotne.

Pewnego komentarza wymaga przyjęta do obliczeń numerycznych wartość pojemności cieplnej powietrza wewnątrz maszyny -  $C_p$ . Wartości tej nie da się w sposób prosty obliczyć. Z doświadczenia wiadomo, że pojemność ta jest bardzo mała w porównaniu z innymi pojemnościami. Dla porównania, najmniejsza pojemność cieplna właściwa pierścieni zwierających klatkę wirnika  $C_{pz} = 377 \frac{J}{k}$ . Przyjęto do obliczeń numerycznych, że pojemność cieplna powietrza  $C_p = I \frac{J}{k}$ . Taka wartość jest z pewnością wielokrotnie większa niż rzeczywista wartość pojemności, jednak przyjęcie jej powoduje wprowadzenie błędu rzędu  $0,5^\circ C$ . Przyjęcie jeszcze mniejszej wartości poprawiłoby dokładność identyfikacji temperatury, a co za tym idzie i rezystancji wirnika, jednak wymagałoby od programu znacznie mniejszego kroku całkowania, co w znacznym stopniu wydłużyłoby obliczenia.

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że metoda zastępczych schematów cieplnych nadaje się do identyfikacji zmian rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego w stanach ustalonych i nieustalonych. Znając zależność strat w danym silniku od napięcia i prądu (charakterystyka biegu jałowego), układ identyfikacji z rys.2 jest w stanie wyznaczyć zmianę rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego, na podstawie jedynie prądu i napięcia stojana. Przyjęcie założeń upraszczających nieznacznie wpływa na dokładność odtwarzanych temperatur w maszynie. Zmiany rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego sięgają ok. 50% jej wartości odpowiadającej temperaturze otoczenia, co może prowadzić do pogorszenia właściwości regulacyjnych układów sterowania. W przypadku analizy schematu cieplnego dla stanu ustalonego można stwierdzić, że określanie rezystancji klatki wirnika następuje w bardzo krótkim czasie, wielokrotnie mniejszym niż rzeczywiste zmiany, zatem można go wykorzystać wszędzie tam, gdzie temperatura silnika szybko się ustala, czyli w małych maszynach, mających niewielką zastępczą cieplną stałą czasową. W takim przypadku układ równań (5) jest rozwiązywany każdorazowo po zmianie wartości prądu stojana.

Dla stanu nieustalonego możliwy jest monitoring rezystancji wirnika silnika w czasie rzeczywistym. Układ wyznacza przyrosty rezystancji klatki wirnika w dowolnej chwili czasu, dzięki czemu można przewidywać jej wartość. Należy zauważyć, że w tym przypadku czas

obliczeń potrzebny do rozwiązania układu równań różniczkowych (3) jest znacznie krótszy niż same zmiany wartości rezystancji.

Dodatkową zaletą omawianej metody jest możliwość wyznaczania rozkładu temperatury silnika indukcyjnego w kilku miejscach, dzięki czemu sygnał o podwyższonej wartości średniej temperatury danego elementu może być przesłany do urządzenia zabezpieczającego, wówczas silnik będzie w znacznie lepszym stopniu zabezpieczony przed skutkami przeciążeń.

#### LITERATURA

1. Cioska A., Drak B., Kluszczyński K., Miksiewicz R., Różycki A.: Komputerowe projektowanie silników asynchronicznych trójfazowych. Opracowanie wykonane w Instytucie Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej. Gliwice maj 1990.
2. Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1994.
3. Krok R.: Zweryfikowany pomiarowo model cieplny do monitorowania rozkładu temperatury w silniku indukcyjnym. XXXVIII International Symposium on Electrical Machines SME 2002, s. 129-138.
4. Mních T.: Układ estymacji rezystancji silnika indukcyjnego. III Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie OWD 2001, s. 64-68.
5. Orłowska-Kowalska T.: Badania symulacyjne i eksperymentalne układu wektorowego sterowania silnika indukcyjnego z obserwatorem stanu. XXXVIII International Symposium on Electrical Machines SME 2002, s.255-268.
6. Pełczewski W.: Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1956.

Recenzent: Doc. dr inż. Jerzy Mukosiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 grudnia 2003 r.

#### Abstract

The paper presents a system for identification of resistance changes of an induction motor squirrel cage (Fig.2.), both in steady and dynamic state. The system identifies changes in the resistance of the squirrel cage on the basis of easily accessible measurement signals in a machine such as stator current and voltage. The identification method is based on the thermal equivalent diagram of an induction motor (Fig.1). This diagram determines temperature changes that are the basis for determining resistance changes of the squirrel cage. The method takes into consideration not only changes of the squirrel cage temperatures caused by the flow of current in a rotor but also the influence of other losses generated in stator windings, magnetic circuits and caused by bearing friction. In the further part of the papers the results of resistance rotor calculations for steady and dynamic state are presented (Fig.3 - Fig.8). The equations of a mathematical model are given for the both states (equation 3 and equation 5). The mathematical model (Eq.3) describes the method of solving the thermal diagram (Fig.1). Simulation investigation with the use of Matlab and Matlab Simulink programs were carried out. For the steady state the values of average steady temperatures of the squirrel cage and other machine elements were calculated. The values mentioned above were the basis for calculating the squirrel cage resistance. For the transient state the resistance changes of the squirrel cage are shown in the following cases: the work at the rated current, the work at the overload current – 1,3 of the rated value, the work at variable load. The conclusions concerning the investigations performed are given in the last part of the paper.