

Tomasz Mnich
Politechnika Śląska, Gliwice

WYKORZYSTANIE MODELI CIEPLNYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH DO ESTYMACJI PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ

MAKE USE OF THERMAL EQUIVALENT DIAGRAMS TO COMPENSATION OF CHANGE OF THE ELECTROMAGNETIC PARAMETERS FOR EXAMPLE IDENTIFY ROTOR SPEED OF INDUCTION MOTORS

Abstract: The paper presents make us method of thermal equivalent diagrams to compensation of changes of the electromagnetic parameters of squirrel cage of induction motors. Rotor speed was estimation for the estimator. In article discussed changes of rotor speed two induction motors on power 3 and 18.5 [kW]. A method for obtaining the change of induction motor speed caused by increase of windings temperature in load and overload state is presented, based on stator and rotor windings resistance thermal increase. The differences between identification rotor speed, are presented comparison of the induction motor windings average temperature obtained from laboratory measurements, and from computer simulation in transient state was performed.

1. Wstęp

Silniki indukcyjne są szeroko stosowane w bardzo wielu gałęziach przemysłu, jako napędy różnego rodzaju urządzeń. Ich stosowanie jest tak powszechne, z uwagi na ich cechy, takie jak prostota konstrukcji i obsługi oraz zasilania, bezawaryjność, duża odporność na czynniki zewnętrzne. Są one stosowane zarówno jako napędy indywidualne konkretnego urządzenia, jak również wchodzi w skład bardziej złożonych układów, jak np. linie technologiczne. W takim przypadku, często praca takiego silnika podlega pewnym rygorom, np. utrzymania stałości prędkości obrotowej, w różnych stanach obciążenia. Silniki takie są wówczas zasilane z układów przekształtnikowych, które odpowiednio korygują zmiany prędkości. Czynniki powodujące zmianę prędkości obrotowej, można podzielić niejako na dwie grupy - zewnętrzne (zmiana obciążenia, napięcia zasilającego) oraz wewnętrzne (zmiana stanu cieplnego). Jeśli układ zasilający dany silnik ma informację o prędkości obrotowej bezpośrednio z czujnika prędkości, wówczas bez większych trudności może korygować zmiany niezależnie od tego, co je powoduje. Jeśli jednak czujnika prędkości w danym silniku nie da się zainstalować, wówczas istotnym problemem jest określanie prędkości obrotowej pośrednio. Istnieje kilka sposobów na określenie prędkości obrotowej. Bazują one na różnego rodzaju modelach matematycznych, na podstawie których prędkość jest określana. Wykonuje się to, na pod

stawie tzw. łatwo mierzalnych wielkości, dostępnych w silniku, takich jak napięcia i prądy fazowe. Określenie prędkości może być wykonane za pomocą obserwatora, lub estymatora. Obserwator posiada w swojej strukturze człon, wypracowujący bezpośrednio błąd danej wielkości. Jego struktura nie bazuje bezpośrednio na modelu matematycznym silnika indukcyjnego. Estymator jest zbudowany bezpośrednio na podstawie modelu matematycznego danego silnika i w swojej strukturze nie zawiera bezpośrednio informacji o błędzie określanej wielkości. Zarówno estymatory, jak i obserwatory są narażone na błędy wyznaczania danej wielkości. Z uwagi na swoją strukturę, bardziej narażone są estymatory, gdyż są one budowane w oparciu o model matematyczny silnika, który jest wrażliwy na zmiany parametrów elektromagnetycznych. Obserwatory są mniej narażone, jednak strojenie ich, dobór tzw. wartości własnych jest skomplikowany, wymaga stosowania złożonych metod, jak algorytmy genetyczne. Stosowanie estymatorów, wiąże się z określeniem błędu, jaki wnosi sam estymator, na skutek zmian parametrów elektromagnetycznych, lub momentu obciążenia, napięcia zasilania. Istnieją metody poprawy dokładności odtwarzania danej wielkości w maszynie, jak stosowanie tzw. obserwatorów typu MRAS [3]. Są to obserwatory z tzw. modelem odniesienia, którym może być inny obserwator, który z uwagi na swoją konstrukcję jest niewrażliwy na

zmianę danej wielkości – jak choćby parametry elektromagnetyczne, lub innym układem, który zmianę tych parametrów może określać. Dokładna znajomość parametrów elektromagnetycznych jest istotna z uwagi na to, że ma się wówczas pewność, że zmiany wartości obserwowanej wielkości, mają swoją przyczynę wyłącznie w czynnikach zewnętrznych, co znacznie poprawia dokładność odtwarzania danej wielkości. W artykule przedstawiono metodę poprawy dokładności odtwarzania prędkości obrotowej w silnikach indukcyjnych, poprzez określenie przyrostów wartości rezystancji stojana i wirnika. Określanie przyrostów, odbywa się dzięki określeniu stanu cieplnego silnika. Określenie stanu cieplnego silnika odbywa się na podstawie łatwo mierzalnych sygnałów, takich jak prąd i napięcie stojana. Zmiany termiczne silnika są określane przy pomocy modeli cieplnych silników. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych, oraz pomiarów na stanowiskach badawczych. Pomiarów wykonano dla dwóch silników indukcyjnych budowy zamkniętej, o mocach 3 kW i 18,5 kW.

2. Układ odtwarzania prędkości obrotowej silnika indukcyjnego, wykorzystujący schemat cieplny

Odtwarzanie prędkości obrotowej, jest procesem dość złożonym z uwagi na to, że w trakcie pracy silnika bardzo wiele wielkości ulega zmianom. Zmiany niektórych wielkości jak np. momentu elektromagnetycznego można stosunkowo łatwo wykryć, mierząc prąd stojana. Jednak określenie zmian parametrów elektromagnetycznych jest znacznie trudniejsze, gdyż nie ma bezpośrednio możliwości określenia ich wartości w trakcie pracy silnika. Jako przykład można tu podać układ sterowania wektorowego, w którym jako zmienne niezależne przyjęto prąd stojana I_s i strumień wirnika Ψ_r , określane jako RFOC (Rotor Fluks Oriented Control) [11]. Model matematyczny dla składowych osiowych, na podstawie których otrzymuje się równania obserwatora strumienia wirnika, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości obrotowej mają następującą postać:

$$U_s = \frac{L_m}{L_r} \left[\frac{d\Psi_r}{dt} + j\omega_x \Psi_r \right] + \quad (1)$$

$$+ L_s \left[\sigma \frac{dI_s}{dt} + \left(\frac{R_{su}(t)}{L_s} + j\omega_x \sigma \right) I_s \right]$$

$$U_r = \frac{d\Psi_r}{dt} + \left[\frac{R_{ru}(t)}{L_r} + j(\omega_x - \omega_r) \right] \Psi_r - \quad (2)$$

$$- \frac{L_m R_{ru}(t)}{L_r} I_s$$

$$M_e = p_b \frac{L_m}{L_r} \operatorname{Re} \{ j \Psi_r I_s^* \} \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p_b}{J} \{ M_e(t) - M_o \} \quad (4)$$

gdzie:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} - \text{współczynnik rozproszenia};$$

U_s – napięcie stojana;

U_r – napięcie wirnika (dla silnika klatkowego $U_r=0$);

Ψ_r – strumień wirnika [8],[10];

ω_r – prędkość kątowna wirnika;

p_b - liczba par biegunów;

J – moment bezwładności mas wirujących;

$M_e(t)$ – moment elektromagnetyczny silnika [8],[11]

M_o – moment obciążenia.

Metoda wyprowadzenia równań (1)-(4.) w całości została zaprezentowana w pracy [10].

Główną przyczyną, która powoduje zmianę parametrów elektromagnetycznych, jest ciepło, wydzielające się w niektórych elementach maszyny, takich jak uzwojenia, rdzeń oraz łożyska. Znając stan cieplny maszyny, można określić zmiany wielkości elektromagnetycznych. W celu określenia stanu cieplnego, wykorzystano metodę zastępczych schematów cieplnych. Zbudowano model cieplny silnika indukcyjnego, którego schemat zastępczy i założenia upraszczające podano w pracach: [1], [3], [4], [5], [6].

W celu wyznaczenia przyrostów temperatury w stanie cieplnie nieustalonym, należy rozwiązać układ równań, który został określony na podstawie schematu cieplnego silnika indukcyjnego, opisanego w [3], [5].

$$C \cdot \frac{dV_k(t)}{dt} + GV = P \quad (5)$$

gdzie:

C - diagonalna macierz pojemności cieplnych poszczególnych elementów silnika,

$v_k(t)$ - wektor przebiegów czasowych średnich temperatur poszczególnych elementów silnika,

G - macierz przewodności cieplnych,

P - wektor strat generowanych w poszczególnych elementach silnika,

t - czas.

Zmiany ciepłe w silniku indukcyjnym, mają największy wpływ na rezystancje uzwojeń stojana i wirnika. Dodatkowo, ich zmiany mają wpływ na wartość odtwarzanej prędkości obrotowej wirnika. Zmiany te można jednak określić, korzystając z zależności dla stanu cieplnie niustalonego:

$$R_u(t) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot v_k(t)) \quad (6)$$

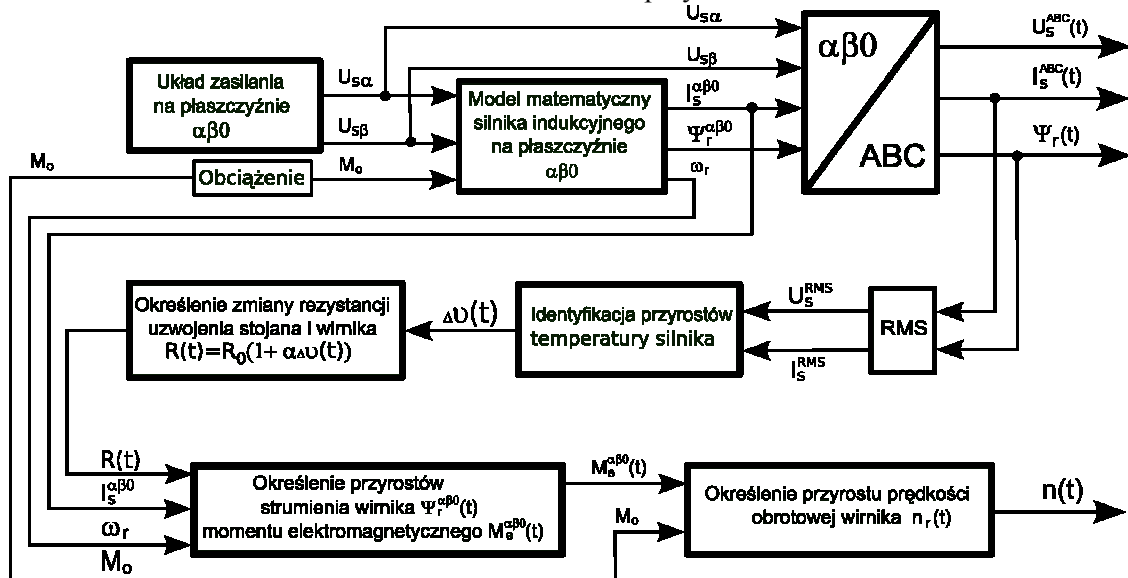
gdzie:

R_0 - rezystancja danego uzwojenia w temperaturze odniesienia [2];

α - temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji materiału, z którego wykonane jest uzwojenie;

Jest to celowe, z uwagi na to, że zmiana rezystancji ma istotny wpływ na przebieg strumienia i momentu elektromagnetycznego [5] a w konsekwencji, na przebieg prędkości obrotowej [6].

Na rysunku 1 przedstawiono schemat estymatora prędkości obrotowej kompensującego zmiany parametrów elektromagnetycznych silnika indukcyjnego, spowodowane zmianami cieplnymi:



Rys.1 Schemat blokowy estymatora prędkości obrotowej silnika indukcyjnego, bazujący na modelu cieplnym silnika oraz na równaniach 1-4

Model ten został zaimplementowany w programie Matlab Simulink. Blok „Identyfikacja przyrostów temperatury” zawiera schemat cieplny silnika indukcyjnego przedstawiony na rysunku 1, opisany równaniem (5). Efektem jego działania są rozkłady średnich temperatur wybranych elementów silnika indukcyjnego. Na ich podstawie są określane przyrosty rezystancji uzwojeń. Rozkłady średnich temperatur są obliczane na podstawie łatwo mierzalnych sygnałów, takich jak wartość skuteczna prądu i napięcia stojana.

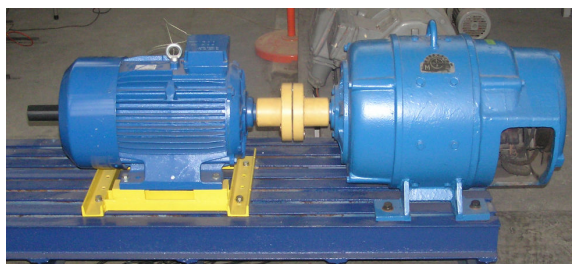
3. Obiekt badań

Badaniom poddano dwa silniki indukcyjne klatkowe, budowy zamkniętej o mocach znamionowych 3 kW i 18,5 kW. Wykonano badania symulacyjne, oraz pomiarowe. Badania symulacyjne wykonano za pomocą pakietu Matlab Simulink. Badania pomiarowe wykonano na specjalnie zaprojektowanych stanowiskach badawczych. Stanowisko badawcze oraz badania pomiarowe silnika 3 kW (rys. 2)



Rys. 2. Stanowisko badawcze silnika 3 kW

zostało omówione w kilku publikacjach, [3], [5], [6]. Stanowisko badawcze silnika indukcyjnego 18,5 kW (rys. 3) zostało zaprojektowane przy założeniu maksymalnej dokładności przeprowadzenia pomiarów, oraz łatwości ich przeprowadzenia.



Rys. 3. Stanowisko badawcze silnika 18,5 kW

Silnik indukcyjny został wyposażony przez producenta w trzy termopary, które zostały w nim umieszczone w trakcie jego produkcji. Każda termopara posiada świadectwo kalibracji.

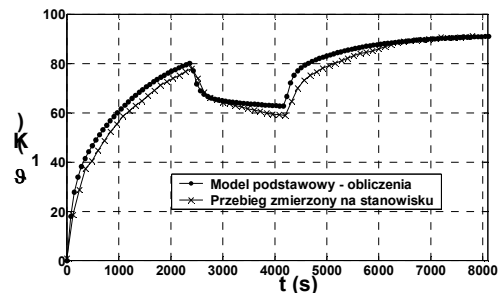
4. Porównanie wyników badań symulacyjnych i pomiarowych silników indukcyjnych

Badania przeprowadzono dla stanów pracy najbardziej typowych dla silników indukcyjnych, tzn. przy obciążeniu znamionowym prądem, oraz przy pracy ze zmiennym obciążeniem. Zmienne obciążenie polegało na początkowym obciążeniu silnika prądem znamionowym, następnie przeciążenie go do $1.2 I_N$ prądu znamionowego a następnie ponownym odciążeniem do prądu znamionowego I_N . Szerzej badania cieplne silników zostały zaprezentowane w pracy [7]

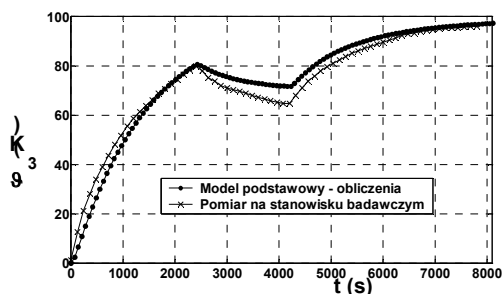
4.1. Badania symulacyjne i pomiarowe silnika indukcyjnego 3 kW

Z uwagi na to, że badania silnika 3 kW były już opisywane w kilku publikacjach [4],[8]

ograniczono się do zaprezentowania wyników pomiarów, dla pracy ze zmiennym obciążeniem.

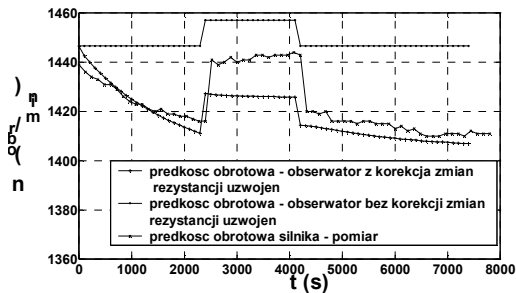


Rys. 4. Przebieg nagrzewania uzwojenia stojana silnika indukcyjnego 18,5 kW stałe obciążenie



Rys. 5. Przebieg nagrzewania wirnika silnika indukcyjnego 3 kW przy zmiennym obciążeniu

Na rysunku 4 i 5 widać dużą zbieżność pomiędzy wynikami otrzymanymi z pomiarów a obliczonymi na podstawie modelu matematycznego.



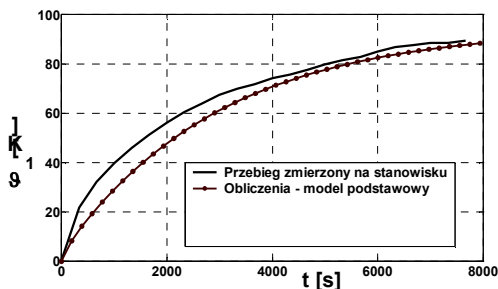
Rys. 6. Przebieg zmian prędkości obrotowej wirnika silnika indukcyjnego 3 kW zmienne obciążenie

Świadczy to o tym, że model dobrze odwzorowuje zjawiska cieplne w maszynie. Dlatego można przypuszczać, że korzystając z równania 6 będzie można znacznie dokładniej odzwierciedlać prędkość obrotową silnika. Na rysunku 6 przedstawiono różnicę w przebiegu prędkości obrotowej, przy zmianach obciążenia maszyny. Przebiegi te otrzymano na podstawie badań symulacyjnych estymatora prędkości.

kości obrotowej, oraz pomiarów na stanowisku badawczym. W pierwszym przypadku, w estymatorze nie korygowano zmian rezystancji. Miał on jedynie informację o zmianach prądu stojana spowodowanego zmianą obciążenia. W drugim przypadku, w estymatorze korygowano zmiany rezystancji uzwojeń, zgodnie z zależnością (6). Estymator, w którym następuje korekcja zmian rezystancji uzwojeń musi odtwarzać prędkość obrotową znacznie dokładniej, niż estymator bez takiej informacji. Z przebiegu widać, że różnica ta nie jest znaczna. Gdy silnik był przeciążony, wynosiła ona ok. 3 [obr./min] . Gorsze wyniki otrzymano gdy silnik był obciążony znamionowo. Tu różnica jest rzędu ok. 15 [obr./min] . W przypadku estymatora bez kompensacji zmian rezystancji uzwojeń, różnica w prędkościach jest znacznie większa. Obrazuje ją rysunek 6. Widać, że w miarę upływu czasu, różnica między prędkością obliczoną i zmierzoną narasta. Przy końcu badań wynosiła ona ok. 36 [obr./min] . Jest to znacznie większa różnica niż w estymatorze z kompensacją zmian rezystancji uzwojeń

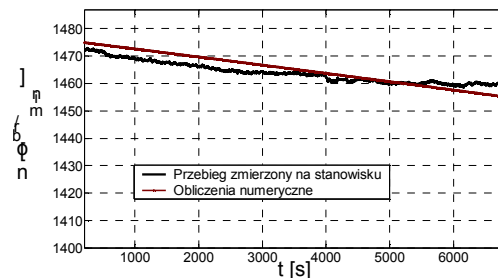
4.2 Badania symulacyjne i pomiarowe silnika indukcyjnego 18,5 [kW]

Przyrost temperatury klatki wirnika był określany analitycznie rozwiązując równanie 5 [3], [4] z uwagi na to, że nie dało się silnika wyposażyć w czujnik temperatury w wirniku.



Rys. 7. Przebieg nagrzewania uzwojenia stojana silnika indukcyjnego 18,5 kW stałe obciążenie

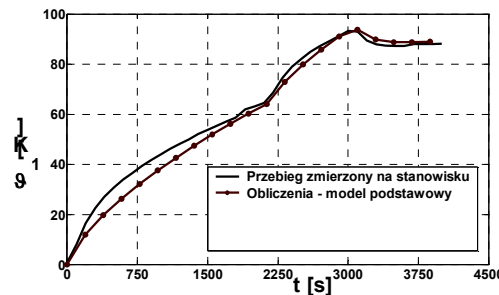
Dla obciążenia znamionowego, otrzymano następujące przebiegi średnich temperatur, oraz prędkości obrotowej:



Rys. 8. Przebieg zmian prędkości obrotowej silnika indukcyjnego 18,5 kW stałe obciążenie

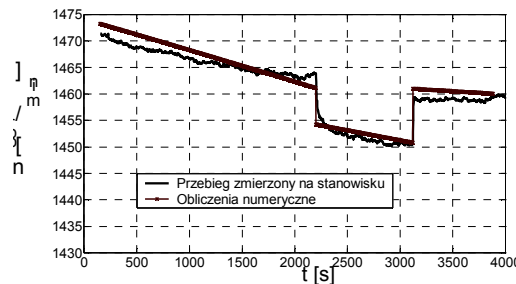
Różnice w otrzymanych rozkładach średniej temperatury uzwojenia stojana, są znikome, w najgorszym przypadku nie przekraczają one 10 [K] . Stąd mała różnica pomiędzy mierzoną a obliczaną wartością prędkości obrotowej wirnika.

Dla obciążenia zmiennego, otrzymano:



Rys. 9. Przebieg nagrzewania uzwojenia stojana silnika indukcyjnego 18,5 kW zmiennie obciążenie

W tym przypadku również widać dużą zbieżność, pomiędzy wartościami obliczonymi a zmierzonymi.



Rys. 10. Przebieg nagrzewania uzwojenia stojana silnika indukcyjnego 18,5 kW zmiennie obciążenie

Należy zauważyć że przy obciążeniu znamionowym, rozbieżność pomiędzy obliczeniami a pomiarami jest prawie identyczna jak na rys.7, co oznacza że badania są powtarzalne. Po zmianie obciążenia, różnice są rzędu około $1-2 \text{ [K]}$. Ze względu na dużą zbieżność okre-

ślania stanu cieplnego silnika, widać, że określanie prędkości obrotowej jest wysokie. Układ przedstawiony na rys. 1 z dużą dokładnością odtwarza prędkość obrotową silnika.

5. Podsumowanie

Na podstawie badań symulacyjnych i pomiarowych, można stwierdzić, że układ (rys. 1) estymujący prędkość obrotową, daje znaczną poprawę dokładności jej odtwarzania. Przedstawiają to przebiegi na rysunku 6, 8 oraz 10. Dzięki metodzie zastępczych schematów cieplnych otrzymuje się informację o stanie cieplnym wybranych elementów maszyny (rys. 4, 5, 7, 9). Mogąc korygować zmiany termiczne rezystancji uzwojeń dzięki zależności 6 można zwiększyć dokładność estymatora prędkości. Można stwierdzić, że wykorzystanie modelu cieplnego do poprawy estymacji prędkości obrotowej jest uzasadnione.

Literatura

- [1]. Cioska A., Drak B., Kluszczyński K., Mikiewicz 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”. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
- [3]. Rehman H., Derdiyok A., Guver M., Xu L.: „An MRAS scheme of on-line rotor resistance adaptation of fan induction machine” IEEE Transaction of Industry Application 2001, pp. 817-821
- [4]. Mních T.: „Wpływ struktury schematu cieplnego w estymatorze rezystancji uzwojeń silnika indukcyjnego na dokładność estymacji prędkości obrotowej.” XV Seminarium Techniczne "Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych", 17-19.05.2006, Ustroń; Zeszyty Proble-

move "Maszyny Elektryczne" BOBRME Nr. 75, Katowice 2006, ss.165-170

- [5]. Mních T. „Wpływ struktury zastępczego schematu cieplnego na dokładność odtwarzania rozkładu średnich temperatur w silnikach indukcyjnych”. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" Z.3 (203), Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007, ss.49-62
- [6]. Mních T.: „Odtwarzanie rozkładu średnich temperatur wybranych elementów silników indukcyjnych przy wykorzystaniu metody zastępczych schematów cieplnych.” XVI Seminarium Techniczne "Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych" 23-25.05.2007, Ryto; Zeszyty Problemowe "Maszyny Elektryczne" BOBRME Nr. 77, Katowice 2007, ss.237-242
- [7]. Mních T.: „Ocena możliwości zastosowania określonego schematu cieplnego silnika indukcyjnego w szerszym zakresie mocy znamionowych” .” XVII Seminarium Techniczne "Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych", Ryto; Zeszyty Problemowe "Maszyny Elektryczne" BOBRME Nr. 79, Katowice 2008, ss.205-210
- [8]. Mních T : „Kompensacja wpływu zmian cieplnych rezystancji uzwojeń silnika indukcyjnego na estymację prędkości obrotowej” XLIII International Symposium on Electrical Machines SME'2007, Poznań, 2-5 July 2007, pp. 221-224
- [9]. Pełczewski W. “Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych” Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1956.
- [10]. Paszek S. „Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego”. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.
- [11]. Vas P.: „Vector control of induction machine” Clarendon Press Oxford 1990.

Autor

Mgr inż. Tomasz Mních
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 032-2372652
e-mail: Tomasz.mnich@polsl.pl