

Tomasz Mnich
Politechnika Śląska, Gliwice

OCENA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA OKREŚLONEGO SCHEMATU CIEPLNEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO W SZERSZYM ZAKRESIE MOCY ZNAMIONOWYCH

ASSESSMENT ABILITIES MAKE USE THE SPECIFIC THERMAL EQUIVALENT DIAGRAM OF INDUCTION MOTOR ON BROADER RANGE OF NOMINAL POWER MOTORS

Abstract: The paper presents assessment abilities make use the basic and three simplified thermal equivalent diagram of induction motor to monitoring temperatures on broader range of nominal power induction motors. In article discussed assumption form construction thermal equivalent diagram, and possibility make us them to monitoring temperature of induction motor. The monitoring of heating of induction motor is presented for example two motors, on power 3 kW and 18,5 kW. Presents verification measurements increase temperatures in 3 kW and 18,5 kW induction motor on measurements station. Precision of computer simulations was compare with basing thermal equivalent diagram – verifying in laboratory measurements. In the end of paper author presents conclusion from computer simulation and laboratory measurements, who was application this method in practical application and what are the limits of power motors to make us the same thermal equivalent diagrams.

1. Wstęp

Znajomość zjawisk cieplnych w maszynach elektrycznych, jest sprawą bardzo istotną z punktu widzenia ich eksploatacji. Nawet niewielkie przekroczenie temperatury dopuszczalnej, wynikającej z klasy izolacji powoduje znaczne skrócenie czasu eksploatacji silnika. W silnikach małych i średnich mocy, czas eksploatacji silnika jest uzależniony od stanu jego izolacji, gdyż wymiana uzwojeń nie zawsze jest opłacalna. Znaczenia, zatem nabierają metody określania stanu cieplnego silnika, szczególnie w warunkach zmiennego obciążenia. Sprawa może być szczególnie istotna, gdy zmianom obciążenia silnika towarzyszą szerokie zmiany temperatury zewnętrznej.

Istnieje wiele metod określania temperatury uzwojeń silnika, z których najczęstszą są zabezpieczenia cieplne (będące integralną częścią układu zasilającego – np. przekształtnika) bazujące na jednowęzłowym modelu cieplnym. Silnik jest urządzeniem silnie niejednorodnym pod względem przewodności cieplnej z uwagi na to, że do jego budowy wykorzystywane są materiały, o różnych przewodnościach cieplnych – jak choćby żelazo i izolacja, oraz o różnych własnościach akumulacyjnych ciepła. W związku z tym, zabezpieczenie bazujące na jednowęzłowym schemacie cieplnym jest niewystarczające. Skutkiem jego działania będzie

określanie temperatury z dużym przybliżeniem, a w konsekwencji do nie pełnego wykorzystania silnika. Innym sposobem jest montaż czujników temperatury w najbardziej narażonych na uszkodzenie elementach - uzwojenia stojana. Instalacja czujników temperatury jest dobrym rozwiązaniem, jednak barierą są tu koszty (szczególnie jest to istotne w małych silnikach). Określanie stanu cieplnego silnika w stanach cieplnie nieustalonych za pomocą zstępczych schematów cieplnych nie jest nowe, lecz przy obecnych możliwościach przetwarzania danych przez typowe komputery, staje się tanią alternatywą dla opisanych wcześniej metod.

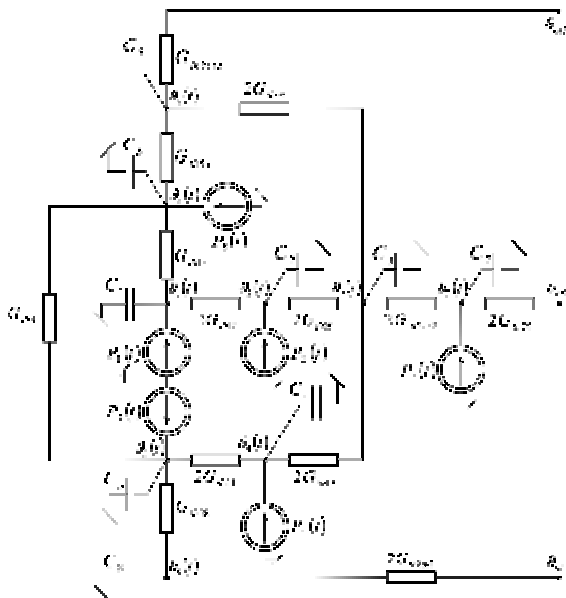
Zaprojektowanie modelu cieplnego silnika w postaci sieci cieplno-elektrycznej jest dość trudne, z uwagi na to, że z jednej strony, musi on być na tyle prosty, aby nie wymagał dużego nakładu obliczeniowego od komputera, a z drugiej strony, aby z zadowalającą dokładnością odwzorowywał rozkłady temperatur w wybranych elementach silnika. Wymaga to od projektanta dobrej znajomości konstrukcji silnika, oraz dróg wymiany ciepła pomiędzy poszczególnymi elementami silnika. Zakładając, że dana struktura modelu cieplnego, opracowana dla jednego silnika, może zostać wykorzystana do określania rozkładu temperatur w innym silniku, istotnym staje się problem – na ile można

dany schemat uprościć w zależności od mocy silnika, aby zapewniał on zadowalającą dokładność w określaniu rozkładów średnich temperatur. Przyjęto założenie, że konstrukcje obu silników będą analogiczne.

W artykule podjęto próbę określenia, na ile zastępczy schemat cieplny, zbudowany dla jednego silnika, odwzorowujący z zadowalającą dokładnością rozkłady temperatury może być wykorzystywany do określania rozkładów temperatury w innym silniku. Badania zostały zaprezentowane dla dwóch silników indukcyjnych budowy zamkniętej, o mocach 3 kW i 18,5 kW.

2. Schemat cieplny silnika indukcyjnego

W niniejszym artykule, jako podstawowy, wykorzystano schemat cieplny przedstawiony na rysunku 1. Został on dokładnie opisany w pracach [3], [4]. Wszystkie parametry tego schematu zostały obliczone na podstawie danych konstrukcyjnych, otrzymanych od producentów silników. Zależności opisujące parametry schematu cieplnego podane są w pracy [1]. Schemat uwzględnia współzależność poszczególnych strat w silniku nie tylko od przepływającego prądu w uzwojeniach, związanych z przemagnesowywaniem rdzenia, tarciami w łożyskach, lecz również wzajemne oddziaływanie ich na siebie.



Rys. 1. Zastępczy schemat cieplny silnika indukcyjnego, do obliczeń w stanie nieustalonym – model podstawowy

Zwiększa to dokładność w określaniu przyrostów średnich temperatur wybranych elementów silnika. W stanie cieplnie nieustalonym,

należy uwzględnić akumulację ciepła przez poszczególne fragmenty silnika.

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].

$$\mathbf{C} \cdot \frac{d\mathbf{v}_k(t)}{dt} + \mathbf{G}\mathbf{v} = \mathbf{P} \quad (1)$$

gdzie:

\mathbf{C} - diagonalna macierz pojemności cieplnych poszczególnych elementów silnika,

$\mathbf{v}_k(t)$ - wektor przebiegów czasowych średnich temperatur poszczególnych elementów silnika,

\mathbf{G} - macierz przewodności cieplnych,

\mathbf{P} - wektor strat generowanych w poszczególnych elementach silnika,

t - czas.

Równanie (1) opisuje schemat cieplny z rysunku 1 oraz wszystkie omawiane poniżej układy. Na podstawie badań omówionych w pracach [3], [4], [5] stwierdzono, że schemat z rysunku 1 dobrze odwzorowuje przyrosty temperatury dla silnika 3 kW. Dodatkowo stwierdzono, że różnice w przyrostach temperatury pomiędzy niektórymi elementami schematu są niewielkie, zatem podjęto próbę uproszczenia struktury schematu cieplnego z rysunku 1. Sposób uproszczenia zastępczego schematu cieplnego z rysunku 1 został opisany w pracach [5], [6]. Omówiono tam trzy uproszczenia, polegające na pominięciu przepływu ciepła w kierunku poosiowym dla uzwojenia stojana (przewodność G_{th12}) – uproszczenie 1, dla prętów wirnika i pierścieni zwierających (przewodność G_{th34}) – uproszczenie 2, oraz pominięto straty tarcia i wentylacyjne, oraz wynikający z nich przepływ ciepła (przewodność G_{th79} i straty mocy $P_7(t)$) – uproszczenie 3. W dalszej części artykułu zostaną zaprezentowane wyniki badań pomiarowych oraz symulacyjnych schematu z rysunku 1 oraz dla trzech jego uproszczeń.

3. Badania stanów cieplnie nieustalonych silników indukcyjnych

Badaniom poddano dwa silniki indukcyjne klatkowe, budowy zamkniętej o mocach znamionowych 3 kW i 18,5 kW. W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych, jako podstawowy schemat cieplny, wykorzystano schemat z rysunku 1. Dodatkowo badaniom poddano

uproszczone schematy cieplne silników indukcyjnych 3 kW i 18,5 kW, których struktura została szeroko omówiona w pracach [5], [6]. Wszystkie przewodności cieplne, straty mocy oraz pojemności cieplne, zostały obliczone dla każdego z silników na podstawie danych konstrukcyjnych.

Weryfikacji pomiarowej dokonano na specjalnie do tego zaprojektowanych stanowiskach pomiarowych. Stanowisko badawcze oraz badania pomiarowe silnika 3 kW (rys. 2)

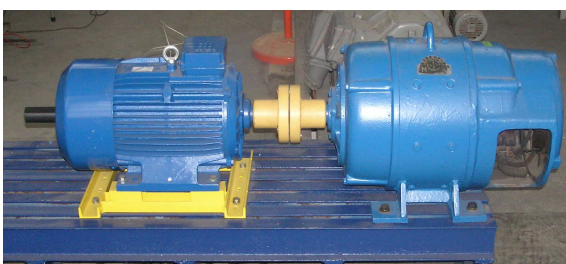


Rys. 2. Stanowisko badawcze silnika 3 kW

zostały omówione w kilku publikacjach, [3], [5], [6]. Stanowisko badawcze dla silnika 18,5 kW (rys. 3) jest stanowiskiem nowo wykonanym.

3.1 Stanowisko pomiarowe silnika 18,5 kW

Stanowisko badawcze silnika indukcyjnego 18,5 kW (rys. 3) zostało zaprojektowane przy założeniu maksymalnej dokładności przeprowadzenia pomiarów, oraz łatwości ich przeprowadzenia.



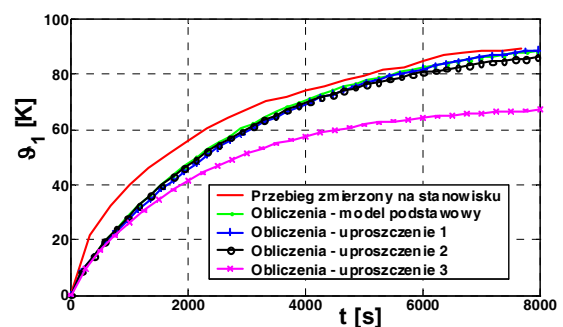
Rys. 3. Stanowisko badawcze silnika 18,5 kW

Silnik indukcyjny został wyposażony przez producenta w trzy termopary, które zostały w nim umieszczone w trakcie jego produkcji. Każda termopara posiada świadectwo kalibracji. W celu zautomatyzowania pomiarów, wykonano system pomiarowy, składający się z dwóch kart pomiarowych. Karta NI USB 9211A dedykowana do pomiarów cieplnych zawiera charakterystyki typowych, produkowanych obecnie termopar. Karta NI PCI 6251 jest

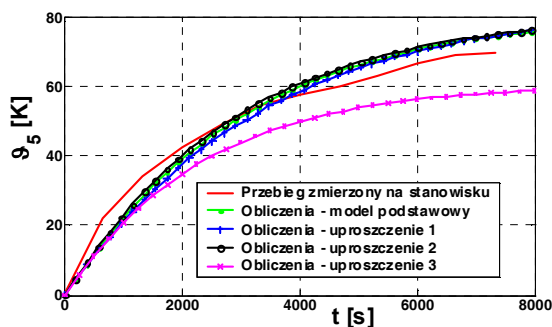
kartą przewidzianą głównie do akwizycji i analizy danych. System pomiarowy, został zaprojektowany w środowisku LabView, umożliwiającym budowę złożonych systemów pomiarowych. Dodatkowo silnik został wyposażony w precyzyjny czujnik prędkości obrotowej. Obciążenie silnika indukcyjnego stanowi prądnicą prądu stałego, o mocy znamionowej 30 kW wraz ze współpracującym z nią układem falownikowym, realizującym zwrot energii do sieci. Dzięki zastosowaniu układu zwrotu energii do sieci, można badać różne stany obciążenia silnika indukcyjnego, w zakresie mocy do 1.2 jego mocy znamionowej.

3.2 Porównanie badań symulacyjnych i pomiarowych silnika indukcyjnego 18,5 kW

Z uwagi na fakt, że w silniku 18,5 kW są umieszczone jedynie 3 termopary – dwie w uzwojeniu stojana, jedna w pakiecie stojana, jako pomiarowe wyniki weryfikacji obliczeń numerycznych przedstawiono rozkłady średnich temperatur w uzwojeniu stojan oraz w pakiecie stojana. Badania wykonano w dwóch przypadkach. W pierwszym silnik był stale obciążony prądem znamionowym I_n , w drugim przypadku silnik był obciążany prądem, zmieniającym się w zakresie od I_n do $1,2 I_n$. Na początku silnik był obciążany prądem znamionowym I_n , następnie był przeciążany $120\%I_n$ wartości prądu znamionowego, a następnie odciążany ponownie do wartości znamionowej prądu I_n . Dla stałego obciążenia widać, że odwzorowanie rozkładu średnich temperatur jest bardzo duże w najistotniejszym z punktu widzenia wrażliwości na uszkodzenie uzwojeniu stojana – (rys. 4). Nie ma tu większego wpływu pominięcie przepływu ciepła wzdłuż uzwojenia stojana, oraz określenie uzwojenia wirnika jako jednego węzła cieplnego.



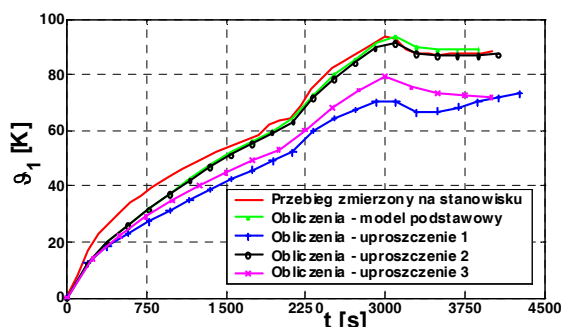
Rys. 4. Przebieg nagrzewania uzwojenia stojana silnika indukcyjnego 18,5 kW przy znamionowym obciążeniu – porównanie modeli



Rys. 5. Przebieg nagrzewania pakietu stojana silnika indukcyjnego 18,5 kW przy znamionowym obciążeniu – porównanie modeli

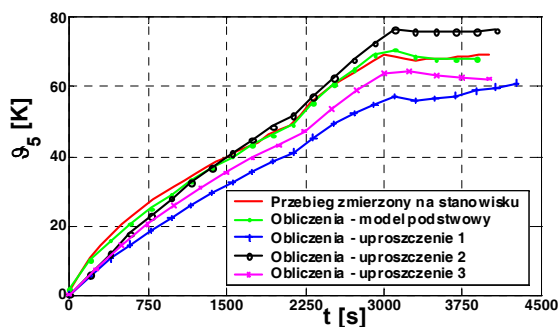
Analogicznie jest dla pakietu stojana - rysunek 5.

Podobną dokładność otrzymano dla pakietu stojana przy zmiennym obciążeniu - rysunek 6. Jednak pominięcie strat powstających w łożyskach, powoduje rozbieżności między obliczeniami, a pomiarami.



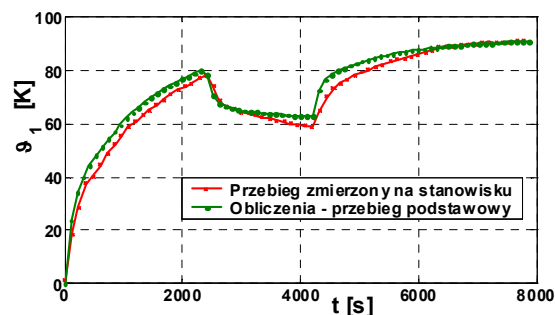
Rys. 6. Przebieg nagrzewania uzwojenia stojana silnika indukcyjnego 18,5 kW przy zmiennym obciążeniu – porównanie modeli

W przypadku zmian obciążenia, obserwuje się również dla podstawowego modelu cieplnego z rysunku 1 dużą zbieżność między pomiarami, a obliczeniami.



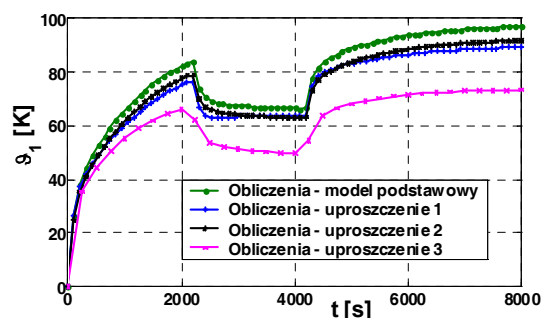
Rys. 7. Przebieg nagrzewania pakietu stojana silnika indukcyjnego 18,5 kW przy zmiennym obciążeniu – porównanie modeli

W silniku 18,5 kW, uproszczenie 1 nie powoduje pogorszenia wyników, co widać na rysunku 6 i rysunku 7. Dla uzwojenia stojana różnica w przyroście temperatury wynosi ok. 2 K. Dla pakietu jest nieco większa, szczególnie po odciążeniu silnika i wynosi ok. 10 K. jednak pominięcie przepływu ciepła poosiowo w wirniku – uproszczenie 2, znacznie obniża jakość odtwarzania średnich temperatur. Dla uzwojenia stojana jak i pakietu stojana wznosi ok. 10 K w najgorszym przypadku. Trzecie uproszczenie powoduje powstanie dość dużej rozbieżności pomiędzy pomiarami a obliczeniami, zarówno dla uzwojeń jak i pakietu. Różnica wynosi ok. 25 K rysunek 6 i rysunek 7. Dla silnika 3 kW w przypadku zmiennego obciążenia, widać znacznie mniejszy wpływ uproszczenia modelu, na wyniki obliczeń (rys. 8 i rys. 9).



Rys. 8. Przebieg nagrzewania uzwojenia stojana silnika indukcyjnego 3 kW przy zmiennym obciążeniu – porównanie obliczeń z pomiarami

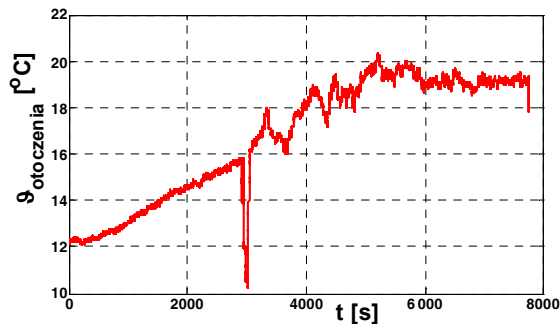
W przypadku tego silnika, ograniczono się do zaprezentowania wyników dla pracy silnika ze zmiennym obciążeniem.



Rys. 9. Przebieg nagrzewania uzwojenia stojana silnika indukcyjnego 3 kW przy zmiennym obciążeniu – porównanie modeli

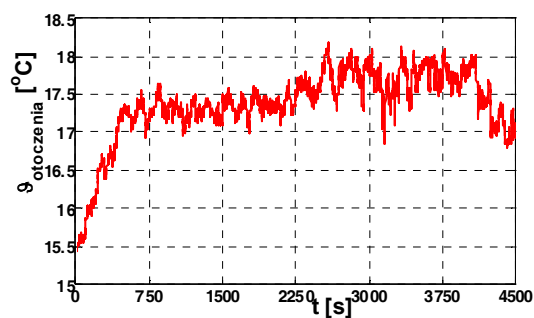
Na rysunku 8 widać, że odwzorowanie średnich temperatur przy zmianach obciążenia jest dość dobre. Wpływ upraszczania modelu z rysunku 1 jest w tym wypadku mniejszy, niż miało to miejsce dla silnika 18,5 kW. Znaczące rozbież-

ności (ok. 25 K) pojawiają się dopiero, przy trzecim uproszczeniu – rysunek 9. Widać wyraźnie zbieżność w zachowaniu się obu modeli cieplnych przy tym uproszczeniu. Należy zwrócić uwagę, że badania pomiarowe silnika 3 kW były przeprowadzone przy założeniu stałej temperatury otoczenia. Pomiar temperatury otoczenia w trakcie pomiarów silnika 18.5 kW wykazał, że temperatura nie była stała. W przypadku przedstawionym na rysunku 10, zmiany temperatury otoczenia były spowodowane szybko zmieniającymi się warunkami pogodowymi (bezpośrednie padanie promieni słonecznych na obudowę silnika). Wpływ nagrzania się otoczenia silnika od samego silnika jest pomijalny, z uwagi na wielkość hali, w której przeprowadzono pomiary.



Rys. 10. Temperatura otoczenia silnika indukcyjnego 18,5 kW w trakcie pomiarów przy znamionowym obciążeniu

Przy zmiennym obciążeniu, przyrost temperatur otoczenia był spowodowany nagrzaniem się samego silnika – rysunek 11

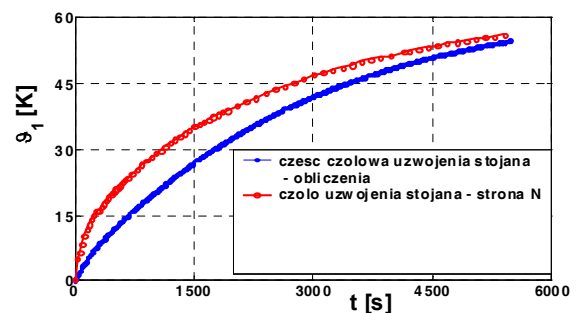


Rys. 11. Temperatura otoczenia silnika indukcyjnego 18,5 kW w trakcie pomiarów przy zmiennym obciążeniu

Zmiana temperatury otoczenia ma wpływ na oddawanie ciepła z powierzchni silnika do otoczenia. W badaniach symulacyjnych założono stałość temperatury otoczenia, co jak się wydaje nie wpłynęło znacząco na pogorszenie wyników pomiarów.

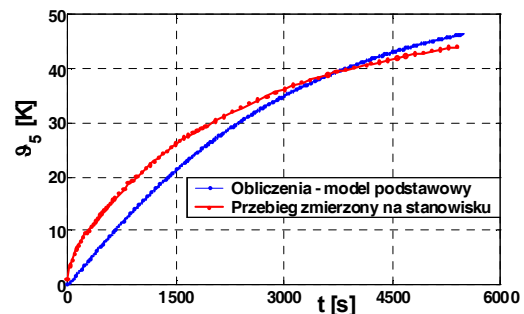
3.3 Wpływ czasu rozruchu silnika indukcyjnego 18.5 kW na wyniki badań

Rozruch silnika i indukcyjnego 18.5 kW jest przeprowadzany za pomocą przełącznika gwiazda-trójkąt. Czas rozruchu jest dość długi, trwa około 2.5 s. Powoduje to, że na samym początku silnik nagrzewa się bardziej, niż gdyby był obciążony daną wartością prądów. Powodem tego jest znacznie większa wartość prądu rozruchowego uzwojeniach – rysunek 12, gorsze są warunki wentylacji w czasie niskich prędkości obrotowych oraz przede-wszystkiem większe straty energii przy wydłużonym rozruchu.



Rys. 12. Wpływ czasu rozruchu na przyrost temperatury uzwojenia stojana silnika 18,5 kW

Widać to dobrze na przebiegach z rysunku 12 i rysunku 13, gdzie rozbieżność między obliczeniami numerycznymi, a badaniami pomiarowymi jest dość dobrze widoczna. Jednak wydaje się, że z punktu widzenia dłuższego monitorowania pracy silnika, gdy nie rozpatruje się przypadków zatrzymania wirnika, a jedynie pracę w typowych dla danego silnika warunkach, nie ma to wpływu na badania.



Rys. 13. Wpływ czasu rozruchu na przyrost temperatury pakietu stojana silnika 18,5 kW

Po pewnym czasie, przyrosty temperatury otrzymywane z badań pomiarowych są zbieżne z otrzymywanymi z obliczeń. Powodem tego jest również fakt, że model cieplny został opra-

cowany z myślą o długotrwałej pracy silnika, z prędkościami bliskimi znamionowej, oraz obciążeniami bliskimi znamionowemu. Podobnych efektów nie obserwuje się w silniku 3 kW, z uwagi na to, że rozruch trwa bardzo krótko, około 0.3 s. Jednak sam fakt pominięcia rozruchu, w przypadku określania rozkładu temperatur w dłuższym cyklu pracy wydaje się nie mieć wpływu na wyniki obliczeń

4. Podsumowanie

Na podstawie badań symulacyjnych i pomiarowych, oraz publikacji prezentowanych na różnych konferencjach można stwierdzić, że metoda zastępczych schematów cieplnych, jest wygodnym i dokładnym narzędziem, diagnozowania stanu nagrzania się silnika, lub jego elementów. Niedogodności, wynikające z trudności zbudowania odpowiedniego schematu cieplnego są rekompensowane przez dużą dokładność odwzorowania średnich temperatur, zarówno w stanie ustalonym, jak i stanach cieplnie nieustalonych. Wykazano, że można stosować jedną strukturę schematu cieplnego silnika, do silnika o innej mocy, jednak o analogicznej konstrukcji jego zestawem parametrów konstrukcyjnych. Daje to możliwość szerszego stosowania tej metody do diagnostyki maszyn, z uwagi na to, że schemat cieplny pozostaje niezmienny, a jedynie wprowadza się do niego dane konstrukcyjne innego silnika, inne wartości napięć i prądów. Dodatkowo można stwierdzić, że uproszczenia schematu cieplnego, nie wpływają znacząco na dokładność odtwarzania średnich temperatur w silniku. Szczególnie pomijanie przepływu ciepła w kierunku poosiowym, w uzwojeniach stojana, lub traktowanie klatki wirnika jako jednego węzła cieplnego, bez rozdziału na pierścień zwierający i pręty, nie powoduje znaczących błędów. Jednak pomijanie strat, wprowadza znacznie większe błędy. Przykładem może tu być pominięcie strat tarcia i wentylacyjnych, które według normy IEC 34 – 2 nie powinny być większe niż 0,5% P_n mocy znamionowej silnika, wpływa to dość silnie na dokładność odtwarzania temperatury w silniku. Zmiana temperatury otoczenia w szerokim zakresie, może prowadzić do znaczących błędów (temperatura otoczenia w dzień i w nocy). Ponadto wykazano, że wpływ czasu rozruchu na dokładność odtwarzania średnich temperatur również nie jest znaczący, jeśli silnik jest eksplo-

atowany w typowych warunkach. Można zatem jednoznacznie stwierdzić, że można stosować schemat cieplny zaprojektowany dla danego silnika, do innego silnika, pod warunkiem, że silnik i innej mocy ma analogiczną konstrukcję. Jest tak przynajmniej dla silników do 20 kW.

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]. Krok R.: „Zweryfikowany pomiarowo model cieplny do monitorowania rozkładu temperatury w silniku indukcyjnym.” XXXVIII International Symposium on Electrical Machines, SME'2002, 18-21 June 2002, Cezdyna-Kielce, pp.129-138
- [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 Problemowe "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]. Pelczewski W. “Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych” Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1956.

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.p

