

**Tomasz Mnich**  
Politechnika Śląska, Gliwice

## **ODTWARZANIE ROZKŁADU ŚREDNICH TEMPERATUR WYBRANYCH ELEMENTÓW SILNIKÓW INDUKCYJNYCH PRZY WYKORZYSTANIU METODY ZASTĘPCZYCH SCHEMATÓW CIEPLNYCH**

### **REPRODUCTION COURSE OF AVERAGE TEMPERATURE IN SELECTED ELEMENTS OF INDUCTION MOTORS, FOR USED THERMAL EQUIVALENT DIAGRAM METHOD**

**Abstract:** The paper presents the thermal equivalent diagram method for define of stator and squirrel cage windings resistance thermal increases of the induction motor. In article discussed assumption form construction thermal equivalent diagram. Them 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 induction motor on measurements station and 18,5 [kW] on base date received from producer of induction motor. In next part of paper was reduction structure of thermal equivalent diagram. Reduction depended to change structure of diagram (e.g. to omit flow of heat between some part of motor) and power loss (e.g. bearing friction and cooling loses). For diagrams, who was construct in effect simplification assumption, effect of computer simulation is presented. Precision of computer simulations was compare with basing thermal equivalent diagram – verifying in laboratory measurements. Courses of stator and rotor windings temperature and rear bearing are presented. In the end of paper author presents conclusion from computer simulation and laboratory measurements, who was application this method in practical application.

#### **1. Wstęp**

Okres eksploatacji silnika indukcyjnego jest uzależniony od tego, jak długo jego izolacja zachowuje odpowiednie własności. Nawet krótkotrwałe przekroczenie temperatury izolacji wynikającej z jej klasy, powoduje skrócenie czasu, w którym taka izolacja będzie zachowywała odpowiednie własności izolacyjne. Istnieje kilka rozwiązań, zapewniających zabezpieczenie cieplne silnika. W silnikach większych mocy, stosuje się czujniki termiczne, umieszczone w uzwojeniach stojana, tarczach łożyskowych itp. Koszt zainstalowania takich czujników w silnikach dużej mocy jest stosunkowo niewielki, jednak w przypadku silników mniejszych, o mocach znamionowych do 20 kW może być porównywalny z kosztem samego silnika. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie specjalnych zabezpieczeń cieplnych przeznaczonych do maszyn elektrycznych, jednak ich koszt jest znaczny i często również wymagają one zastosowania czujników zainstalowanych w silniku. W związku z tym, istnieje potrzeba opracowania metody, która nie ingeruje w silnik bezpośrednio, nie wymaga instalowania czujników wewnątrz samej maszyny. Musi ona bazować na tzw. łatwo mierzalnych sygnałach,

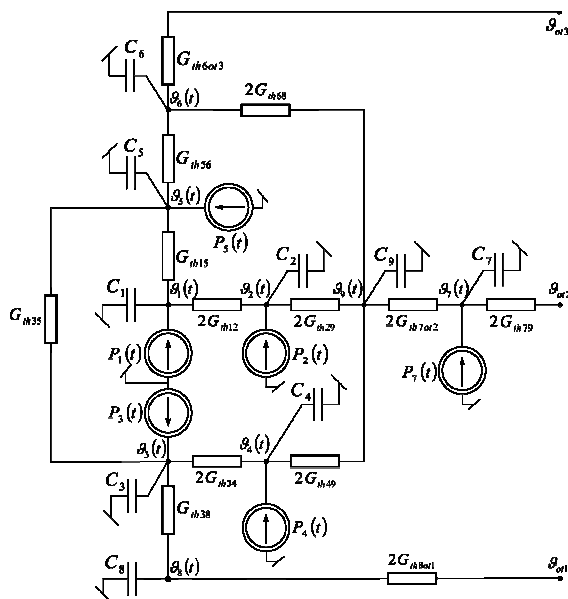
takich jak wartości prądu i napięcia zasilania silnika. W celu właściwego monitorowania temperatury w silniku, konieczne jest zbudowanie odpowiednio dokładnego modelu silnika, odwzorowującego z jednej strony straty wydzielające się w silniku w zmiennych warunkach zasilania i obciążenia, a z drugiej oddawanie ciepła do otoczenia, poprzez złożony układ różnych elementów, mających różną przewodność i pojemność cieplną. W niniejszym artykule zaproponowano wykorzystanie tzw. metody zastępczych schematów cieplnych, która umożliwia przedstawienie całego silnika w postaci sieci cieplno-elektrycznej. Model taki, opisuje zjawiska cieplne w maszynie całościowo, uwzględniając przepływ ciepła poprzez poszczególne elementy silnika oraz jego oddawanie do otoczenia. Uwzględnia również zmiany strat w wybranych elementach od przyrostu ich temperatury. Wielkościami, które należy zmierzyć, aby można było wyznaczyć rozkłady średnich temperatur w wybranych elementach silnika, są wartości skuteczne prądu i napięcia.

Wielkości te nie muszą być monitorowane na bieżąco, wystarczy, aby zmierzyć je raz,

a następnie rejestrować jedynie ich zmiany i wprowadzać do opracowanego modelu. Modele zostały wykonane 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 [1, 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 1

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) jest równaniem, które opisuje schemat cieplny z rysunku 1 oraz wszystkie omawiane poniżej układy.

## 3. Badania symulacyjne i pomiarowe modelu cieplnego

Badaniom pomiarowym w laboratorium poddano silnik indukcyjny o mocy 3 kW. Wyniki tych badań zostały zaprezentowane w publikacjach [3, 4, 5]. Weryfikację pomiarową dla silnika 18,5 kW dokonano pośrednio, na podstawie danych dostarczonych przez producenta silnika. Dodatkowo wyznaczono straty mocy w podstawowych elementach, takich jak uzwojenia stojana i wirnika, pakiecie oraz wentylacyjne, które porównano z wartościami zmierzonymi przez producenta. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli:

Element silnika	Pomiar [W]	Obliczenia [W]
Uzwojenie stojana	746	754,7
Uzwojenie wirnika	477	458,2
Pakiet	472	477
Straty wentylacyjne	194	178

Widać dobrą zbieżność pomiędzy wartościami obliczonymi a otrzymanymi z pomiarów.

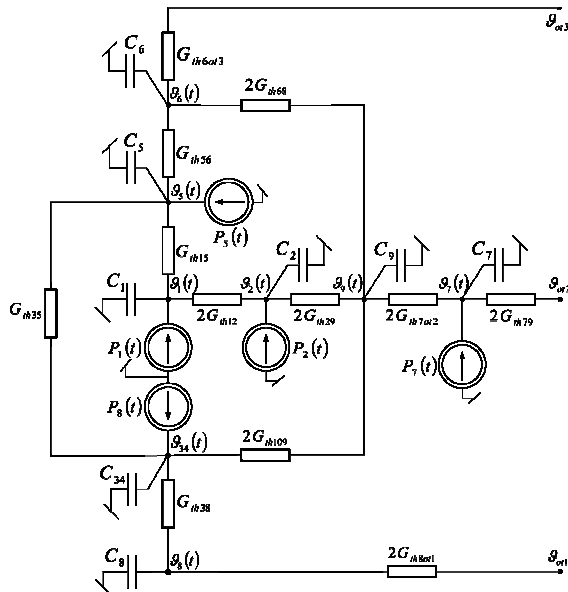
## 4. Uprozczone modele cieplne silnika indukcyjnego

Struktura schematu cieplnego, zawsze jest kompromisem pomiędzy tym, jak dokładnie ma on odwzorowywać zjawiska cieplne w silniku, a czasem obliczeń jaki jest wymagany do jego rozwiązania. Z jednej strony złożony schemat cieplny daje dokładną informację o stanie cieplnym danego elementu silnika, lub nawet fragmentu tego elementu. Jednak taki schemat wymaga bardzo dużego nakładu obliczeniowego, co w konsekwencji powoduje, że czas

jaki jest wymagany na obliczenia jest bardzo długi. Wprowadzenie dodatkowego węzła cieplnego, w którym wyznaczany jest rozkład średniej temperatury, powoduje zwiększenie rozmiaru układu równań (1) o jeden rząd. Z drugiej strony zbudowanie schematu silnie uproszczonego, np. w postaci jednowęzłowego, znacząco skraca czas obliczeń, jednak dokładność odwzorowania średnich temperatur przez taki schemat jest bardzo niska. Określenie optymalnej struktury zastępczego schematu cieplnego, jest więc czynnością złożoną, wymagającą wybrania kompromisu, pomiędzy czasem obliczeń, a dokładnością rozwiązania. Na podstawie badań symulacyjnych i pomiarowych, omówionych w pracach [3, 4, 5] dokonano uproszczeń struktury modeli cieplnych.

#### 4.1 Obwód wirnika reprezentowany przez jeden węzeł cieplny

Z uwagi na dużą zbieżność między przyrostami temperatury klatki wirnika, a pierścieniami zwierającymi, przyjęto założenie upraszczające schemat z rysunku 1.



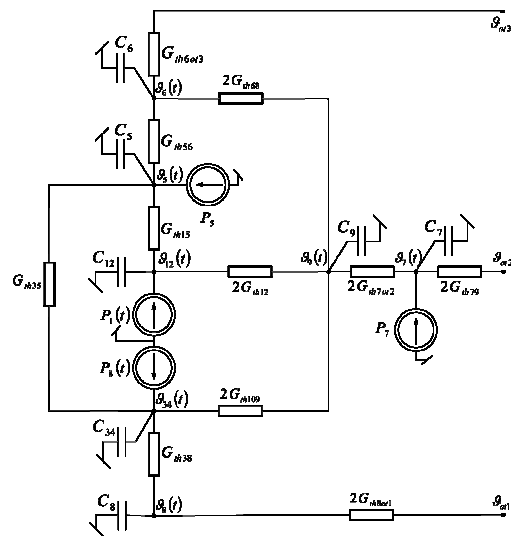
Rys. 2. Schemat cieplny reprezentujący obwód wirnika jako jeden węzeł cieplny – model 2

Założenie to polega na pominięciu przepływu ciepła pomiędzy prętami wirnika, a pierścieniami zwierającymi, traktując obwód wirnika jako ciało jednorodne. Straty generowane w obwodzie wirnika są sumą strat powstających w prętach klatki i pierścieniach zwierających. Korzystając z powyższego założenia, zbudowano schemat cieplny przedstawiony na ry-

sunku 2. Wymiana ciepła zachodzi w tym przypadku pomiędzy uzwojeniem wirnika, a żelazem pakietu wirnika do wału oraz między uzwojeniem, a powietrzem wewnątrz silnika.

#### 4.2 Uzwojenie stojana reprezentowane przez węzeł cieplny

Pominięcie przepływu ciepła pomiędzy częścią czołową a żłobkową uzwojenia stojana nie jest już tak oczywiste, gdyż jak wynika z pomiarów jak i obliczeń [5], różnica między temperaturami w obu częściach wynosi nie więcej niż 12 K.



Rys. 3. Schemat cieplny reprezentujący obwód stojana jako jeden węzeł cieplny - model 3

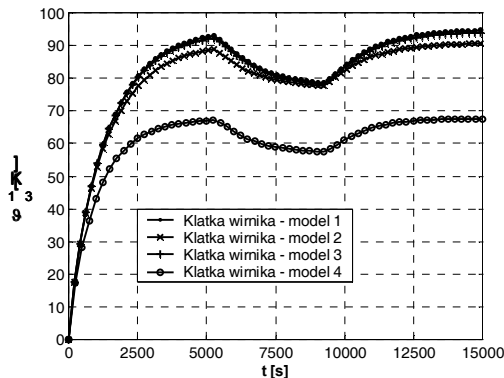
Wyższa temperatura odnosi się do części czołowej. W trakcie badań symulacyjnych, zweryfikowanych pomiarowo dla silnika 3 kW wykazano [5], że uproszczenie takie nie wpływa znacząco na różnice między obliczeniami a pomiarami. W związku z tym straty w uzwojeniu stojana potraktowano łącznie, nie rozdzielono ich na poszczególne części. Korzystając z powyższego założenia, zbudowano schemat cieplny przedstawiony na rysunku 3. Wymiana ciepła w tym przypadku zachodzi między uzwojeniem stojana a pakietem stojana, oraz powietrzem wewnątrz silnika.

#### 4.3 Pominięcie strat w łożyskach i strat wentylacyjne

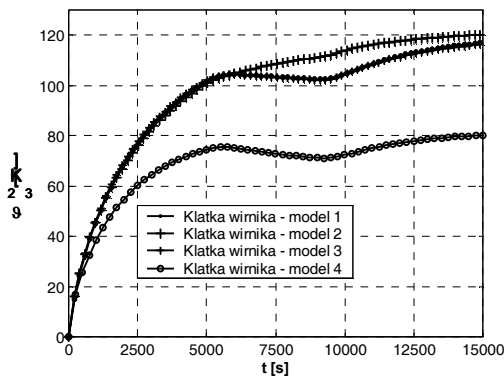
Pominięto straty w łożyskach i straty wentylacyjne z dwóch powodów. Po pierwsze dlatego, że ich wartości są znacznie mniejsze niż pozostałych strat, oraz ponieważ powodują one nagrzanie przede wszystkim tarcz łożyskowych oraz powietrza wewnątrz silnika. W mniejszym



obliczenia różnice w przyrostach temperatury sięgają około 25 K dla silnika 3 kW, oraz 35 K dla silnika 18,5 kW. W przypadku tarcz łożyskowych, wyniki są również podobne. Modele z rysunków 1 do 4 dają wyniki różniące się o około 3 K, co widać na rysunku 9 dla silnika o mocy 3 kW, więc są dokładnie odwzorowują przyrost temperatury.

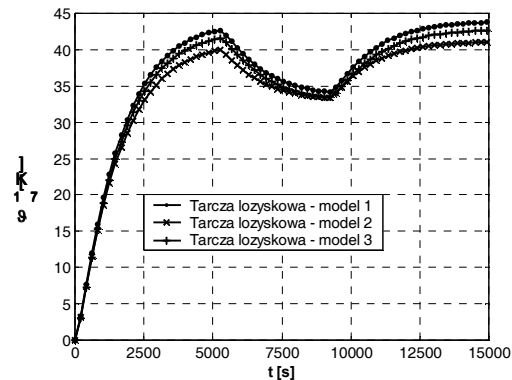


Rys. 7. Rozkład średnich temperatur uzwojenia wirnika silnika 3 kW – porównanie modeli



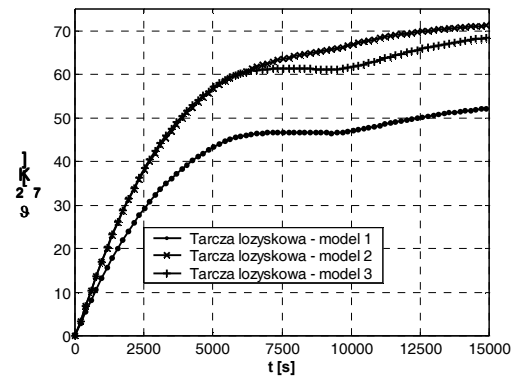
Rys. 8. Rozkład średnich temperatur uzwojenia wirnika silnika 18,5 kW – porównanie modeli

Jednak dla silnika 18,5 kW różnica jest już znaczna i wynosi 18 K. Przebieg charakterystyk pokazano na rysunku 10. Rozbieżności są tym większe, im więcej uproszczeń przyjęto w celu zbudowania danego modelu oraz im większy jest silnik. Na podstawie przebiegów przyrostów średnich temperatur, przedstawionych na rysunkach 5 do 10 widać, że w małych silnikach można stosować modele bardziej uproszczone i nie wpływa to znacząco na dokładność otrzymanych wyników.



Rys. 9. Rozkład średnich temperatur tarcz łożyskowych silnika 3 kW – porównanie modeli

Dla silników większych (np. silnik 18,5 kW) w celu uzyskania zadowalającej dokładności, należy stosować modele bardziej rozbudowane.



Rys. 10. Rozkład średnich temperatur tarcz łożyskowych silnika 18,5 kW – porównanie modeli

Na podstawie powyższych badań można stwierdzić, że należy stosować bardziej uproszczone modele dla małych silników, dzięki czemu otrzymuje się zadowalającą dokładność w krótkim czasie, a bardziej rozbudowane dla większych silników. Czas rozwiązywania modelu bardziej złożonego także jest krótszy, niż cieplna stała czasowa silnika takiego silnika.

Różnice w przebiegach, dla modelu silnika 18,5 kW są bardziej widoczne z uwagi na to, że w dużych silnikach wartości strat są większe, przepływ ciepła jest bardziej utrudniony z uwagi na większe przewodności cieplne związane w wymiarami elementów, oraz pojemności cieplne są tu większe. Silnik taki znacznie wolniej reaguje cieplnie na zmiany obciążenia.

## 6. Uwagi końcowe

Określanie rozkładu średnich temperatur silnika indukcyjnego, za pomocą metody zastępczych schematów cieplnych, wydaje się uzasadnione, z uwagi na możliwość ich odwzorowania z dużą dokładnością. Metoda ta nie ingeruje w konstrukcję silnika, tzn. nie wymaga instalowania w nim dodatkowych elementów, takich jak czujniki. Stosowanie jej jest uzasadnione szczególnie do silników małej i średniej mocy – takich jak zaprezentowane w niniejszej publikacji. Innym zastosowaniem takiego modelu, może być dobór nastaw zabezpieczeń cieplnych już istniejących, w których nastawy można skorygować, pod kątem najbardziej narażonego na uszkodzenie cieplne elementu silnika. Modyfikowanie podstawowego schematu cieplnego, zaprezentowanego na rysunku 1 daje znaczne przyśpieszenie czasu obliczeń, przy zachowaniu założonej dokładności otrzymanych wyników. Metoda ta daje się łatwo adoptować do większych silników. Jednak w takim wypadku, wydaje się celowe budowanie znacznie bardziej złożonych schematów, w których zamiast średnich temperatur poszczególnych elementów silnika, takich jak np. uzwojenia, powinno się stosować podział elementu na tzw. obszary różnicowe, czyli niewielkie fragmenty, w których określa się straty, oraz przepływ ciepła zarówno pomiędzy sąsiednimi obszarami tego samego elementu, jak i między danym fragmentem, a fragmentem pakietu. Takie podejście, może okazać się bardzo użyteczne na etapie konstrukcji silnika, lub modyfikacji jego konstrukcji. Pociąga za sobą znaczący wzrost czasu obliczeń, jednak umożliwia choć częściowe zweryfikowanie modyfikacji konstrukcyjnej, bez konieczności budowania kosztownego prototypu silnika i badania go pomiarowo.

## 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]. Mnich T., „Wykorzystanie metody zastępczego schematu cieplnego do identyfikacji zmian rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego w stanach ustalonych i nieustalonych”. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej seria Elektryka nr.188 str.125-135
- [4]. Mnich T. „Zastosowanie zweryfikowanego pomiarowo obserwatora zmian rezystancji klatki wirnika silnika indukcyjnego za pomocą karty szybkiego prototypowania dSPACE 1103 do poprawy dokładności estymacji strumienia wirnika Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej seria Elektryka nr.188 str. 135-147
- [5]. Mnich T. „Wpływ struktury schematu cieplnego na dokładność estymacji prędkości obrotowej”. Zeszyty Problemowe Maszyn Elektrycznych nr. 75/2006, str. 165-170
- [6]. Paszek S. „Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego”. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.
- [7]. Pełczewski W. “Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych” Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1956.
- [8]. Różycki A., *Laboratorium badań cieplno-wentylacyjnych maszyn elektrycznych i transformatorów*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1982

## Autor

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