

**Jerzy Mukosiej**  
Instytut Elektrotechniki

## PROBLEM DOKŁADNOŚCI BADAŃ CIEPLNYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH

### Streszczenie

Wyniki obliczeń cieplnych maszyn elektrycznych zwykle uznaje się za poprawne, gdy są zgodne z wynikami badań uznawanymi za wzorzec porównawczy. Jednak do wyników badań również należy podchodzić krytycznie. W referacie omówione są problemy sposobu pomiaru porównywanych wielkości, pomiaru strat i ich lokalizacji, sposób pomiaru średnich przyrostów temperatur uzwojeń oraz poprawności umieszczenia czujników temperatury, ich liczby i lokalizacji. Analiza jest ilustrowana wynikami badań.

### 1. Wstęp

Przez zgodność wyników obliczeń cieplnych maszyn elektrycznych z wynikami badań (jak przy każdym obliczaniu) z jednej strony uznaje się, że zastosowana metoda obliczeń jest poprawna, a z drugiej strony, że przyjęto odpowiednie dane do obliczeń.

Taka interpretacja dowodzi, że wyniki pomiarów są traktowane, jako wzorzec porównawczy. Istotnie taka zgodność porównań średnich przyrostów temperatur może świadczyć o poprawności obu wyników obliczeń i pomiarów, ale może być również przypadkowa, gdy błędy poszczególnych wyników się kompensują. Dlatego wyniki obliczeń cieplnych można uznać za poprawne wówczas, gdy oprócz średniego przyrostu temperatury uzwojenia, istnieje zgodność również temperatur innych części maszyny.

Wyniki badań powinny być także przyjmowane krytycznie, chociaż należy zmierzać by wyniki pomiarów były możliwie najdokładniejsze. Sama wysoka klasa przyrządów nie zapewnia odpowiedniej dokładności pomiarów. Ważne jest by zastosować odpowiednią metodę pomiarów poszczególnych wielkości, szczególnie przy badaniach cieplnych.

W referacie prezentowane są metody używane przy badaniach cieplnych oraz przyczyny niedokładności tych pomiarów. Celem dyskusji jest stwierdzenie, w jakim zakresie wyniki obliczeń mogą być porównywane z wynikami badań i o ile wyniki badań są wiarygodne.

Należy zwrócić uwagę, że obliczenia ciepłe maszyny elektrycznej opierają się na następujących wynikach obliczeń:

- Elektromagnetycznych (obliczenie strat i ich lokalizacji)
- Wentylacyjnych (obliczenie ilości chłodziwa i jego prędkości)
- Konstrukcyjnych (obliczenie parametrów materiałów i ich wymiarów)

Stąd poprawność wyników obliczeń cieplnych można otrzymać, gdy wyniki wspomnianych wyżej cząstkowych obliczeń są dobre.

Analiza prezentowana w referacie dotyczy wszystkich rodzajów maszyn, lecz będzie ilustrowana przykładami użebrowanego silnika indukcyjnego.

Porównując wyniki obliczeń z wynikami badań konieczna jest znajomość nie tylko różnic między wynikami, lecz także o możliwych przyczynach ewentualnej niezgodności, czy leży po stronie obliczeniowej czy pomiarowej i na czym konkretnie polega i czym jest spowodowana.

Należy mieć na uwadze również fakt istnienia rozrzutu produkcyjnego: czy proces produkcyjny maszyny uzasadnia porównanie wyników obliczeń z badaniem pojedynczego egzemplarza silnika czy konieczne jest zbadanie większej liczby maszyn tego typu. Oczywiście nie można uzyskać większej dokładności pomiarów niż wynosi rozrzut produkcyjny i powtarzalność wyników badań.

Jest ważne, jaki rodzaj wyników obliczeń jest porównywany z wynikami badań. Jako zasada wynik obliczeń cieplnych jest uważany za poprawny, gdy istnieje zgodność między obliczonymi i pomierzonymi średnimi przyrostami temperatury uzwojeń. Wynika to nawet z przepisów normalizacyjnych. Jednak o całkowitej zgodności można mówić wówczas,

gdy nie tylko przyrosty temperatur uzwojeń są sobie odpowiednio równe, lecz także gdy rozkład temperatur poszczególnych części maszyny zgadza się z pomierzonym.

## 2. Wpływ strat na nagrzewanie uzwojeń

W obliczeniach cieplnych największą rolę na dokładność obliczeń przyrostów temperatur odgrywają straty w uzwojeniach. Mniejszy, lecz znaczący wpływ mają straty w żelazie oraz straty dodatkowe. Straty w uzwojeniach są liczone dokładnie w przypadku, gdy poprawnie są obliczone oporności uzwojeń i prądy uzwojeń. Dokładność tych strat jest, więc zależna od obliczeń elektromagnetycznych silnika. Podobnie obliczanie strat w żelazie i strat dodatkowych to wynik obliczeń elektromagnetycznych. Przy porównaniu strat pomierzonych w uzwojeniach ze stratami obliczonymi należy brać pod uwagę, że straty te zależą od temperatury uzwojeń, a więc od przyrostów temperatur uzwojeń i temperatury otoczenia, a więc zależą od warunków, w jakich znajduje się badana maszyna. Stąd do poprawnego wyznaczenia strat w uzwojeniach należy znać poprawną wartość przyrostów temperatury uzwojeń. W przypadku maszyny prądu zmiennego przyrost temperatury uzwojenia stojana należy zmierzyć w czasie pracy silnika [5], w przeciwnym przypadku zmierzony przyrost temperatury uzwojenia jest zaniżony.

$$\Delta \vartheta_s < \Delta \vartheta_n < \Delta \vartheta$$

Straty w żelazie np. silnika indukcyjnego z reguły mierzone są podczas próby biegu jałowego, a w istocie – przy obciążeniu – mają wartość mniejszą gdyż SEM jest mniejsza od napięcia zasilania silnika przy próbie biegu jałowego. Pomiar strat dodatkowych wykonuje się przybliżonymi metodami zastępczymi, lub metodami bezpośrednimi, ale mało dokładnymi, gdyż wynik uzyskuje się po odjęciu dwóch dużych zbliżonych wartości.

Jest też istotne, w jakich warunkach wykonywane są – porównywane z obliczeniem – próby nagrzewania, czy przy znamionowej mocy na wale, czy przy znamionowych (obliczonych) prądach znamionowych, co z reguły jest różne.

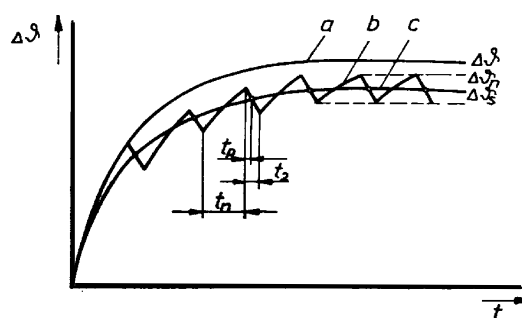
Przy badaniu z mocą znamionową prądy różnią się od obliczonych, a przy badaniu przy

(obliczonym) prądzie znamionowym, moc na wale różni się od znamionowej.

Do obliczania strat cieplnych należy też znać lokalizację strat. Niestety nie jest możliwy pomiar lokalizacji wszystkich składników strat np. na część czołową i żłobkową uzwojenia, na część zębową i jarzmową rdzenia itd. Rozkład niektórych strat można oszacować tylko metodą pomiarowo-obliczeniową.

## 3. Pomiar średniej temperatury uzwojenia metodą oporową

Pomiar średniego przyrostu temperatury metodą oporową technicznie należy do najłatwiejszych. Wykonuje się go mierząc oporność uzwojenia w stanie zimnym i nagrzanym. Warunki pomiaru oporności są istotne. Pomiar oporności w stanie zimnym jest prosty, należy tylko przestrzegać by wyznaczyć temperaturę maszyny w stanie zimnym, a nie aktualną temperaturę otoczenia.



Rys. 1 Krzywe nagrzewania uzwojenia

a –  $\Delta \vartheta$  – rzeczywisty przebieg temperatury przy próbie nagrzewania w stanie ciągłym  
b –  $\Delta \vartheta_s$  – przyrost temperatury przy pracy przerywanej, pomiar wykonywany po zatrzymaniu maszyny  
c –  $\Delta \vartheta_n$  – przyjmowany przebieg przyrostu temperatury

Do pomiaru oporności uzwojenia w stanie nagrzanym stosuje się trzy sposoby.

### 3.1. Metoda superpozycji

Metoda ta [1,2,5] pozwala zmierzyć oporność uzwojenia bez przerywania próby nagrzewania. W zasadzie metoda ta jest używana do maszyn

niskiego i średniego napięcia. Służy do tego specjalnie wykonany mostek Thompsona z odpowiednio zaprojektowanymi dławikami. Mostek ten pozwala mierzyć oporność w dowolnej chwili, dzięki czemu można uzyskać prawdziwy przebieg krzywej nagrzewania zaznaczony na rys. 1 literą a. Metoda ta pozwala na stwierdzenie, kiedy wystąpiło ustalenie przebiegu krzywej nagrzewania.

### 3.2. Metoda pomiaru krzywej nagrzewania przy zatrzymaniu maszyny

Przy braku specjalnego mostka dostosowanego do pomiaru oporności podczas obciążenia silnika wykonuje się pomiary oporności po odłączeniu napięcia i zatrzymaniu silnika. Pomiar ten wykonuje się zwykle, co pół godziny. Zatrzymuje się silnik w jak najkrótszym czasie, aby uzwojenie nie zdążyło ostygnąć. Mimo to oporność jest mniejsza niż przed zatrzymaniem i obliczony w ten sposób przyrost temperatury jest niższy niż w metodzie superpozycji. Po pomiarze znowu uruchamia się silnik. Przebieg temperatury w tej procedurze pomiarowej przedstawia krzywa b na Rys.1.

### 3.3 Metoda pomiaru przyrostu temperatury bez zdejmowania krzywej nagrzewania

Jeśli nie ma potrzeby zdejmowania krzywej nagrzewania, a wystarczy tylko pomierzyć ustalony przyrost temperatury uzwojenia, wówczas wykonuje się próbę nagrzewania tak długo aż silnik uzyska ustalony przyrost temperatury. Kontrolę uzyskania stanu cieplnie ustalonego dokonuje się za pomocą termometru lub czujników wbudowanych.

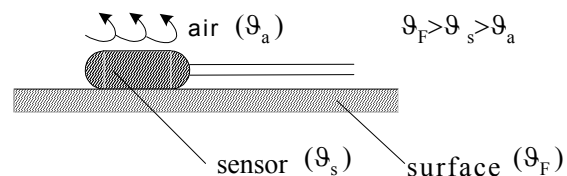
Po odłączeniu maszyny od sieci i jak najszybszym zahamowaniu wykonuje się pomiar oporności tej fazy uzwojenia, której oporność była mierzona na zimno. Ponieważ wykonuje się tylko pomiar jednej temperatury, więc należy go przeprowadzić z jak największą dokładnością. Można to uzyskać przez zdejmowanie krzywej stygnięcia uzwojenia i ekstrapolację na chwilę wyłączenia.

### 4. Pomiar temperatury uzwojenia stojana za pomocą wbudowanych czujników.

Jako czujniki wbudowane stosuje się termometry oporowe, termistory i

termoelementy. Najchętniej są stosowane termoelementy gdyż mają charakterystykę zbliżoną do liniowej. Ich charakterystyka nie jest ściśle liniowa. Krzywa  $\Delta\theta=f(U)$  zależy od temperatury, w której umieszczona jest zimna spoina termopary. Najwygodniejsze jest umieszczenie jej w czasie skalowania i w podczas pomiaru w termosie z lodem o temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$ .

Sposób zamocowania termoelementów ma zasadnicze znaczenie. Umieszczenie spoiny termoelementu w połączeniu czołowym wykonanego silnika nie jest proste. Umieszcza się go w taki sposób, by styk z powierzchnią czoła uzwojenia był jak najlepszy, a jednocześnie by był on cieplnie odizolowany od poruszającego się powietrza. Wynika to stąd, że termoelement jak każdy czujnik pomiarowy mierzy *swą własną temperaturę*. Wmontowanie termoelementu musi być, więc takie by jego temperatura w maksymalnym stopniu była zbliżona do temperatury obiektu mierzonego. (rys. 2). Ten sposób zakłóca jednak pole temperaturowe w miejscu pomiaru gdyż utrudnia odprowadzanie ciepła z miejsca pomiaru przez czujnik temperatury. Tylko przez odpowiednie zainstalowanie spoiny termopary w czole - w miarę możliwości we wnętrzu czoła - można uzyskać zadawalającą dokładność pomiaru.



Rys.2 Pomiar temperatury powierzchni czoła uzwojenia

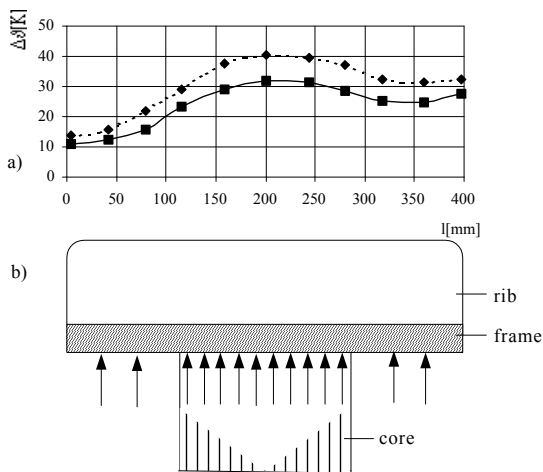
Lepszy styk z mierzonym obiektem uzyskuje się mierząc np. temperaturę w żłobkowej części uzwojenia. Tu termometr umieszcza się wewnątrz uzwojenia lub na jego powierzchni. Zależnie od tego będzie on mierzył temperaturę odpowiedniego miejsca. W tym przypadku gradient temperatury na termoelemencie jest niewielki i czujnik mierzy temperaturę miejsca zainstalowania. Trudność tej lokalizacji wynika stąd, że praktycznie możliwość zainstalowania termopary istnieje podczas wytwarzania maszyny.

Należy zwrócić uwagę, że termopara służy do punktowego pomiaru temperatury. Dlatego nie można uznać tego pomiaru, jako wartość odpowiadającą temperaturze czoła. Temperatura czoła zmienia się wzdłuż przewodów, inna jest na powierzchni wewnętrznej (od strony wirnika) i na powierzchni zewnętrznej (od strony kadłuba). Należy więc przyjąć, że do porównania obliczonej i pomierzonej temperatury czoła należy podchodzić z pewną ostrożnością.

### 5. Pomiar temperatury ożebrowanego kadłuba silnika

Technicznie zainstalowanie termopar w kadłubie jest łatwiejsze niż w uzwojeniu stojana, gdyż dostęp do kadłuba jest łatwiejszy. Tu jednak również należy brać pod uwagę, że temperatura kadłuba zmienia się:

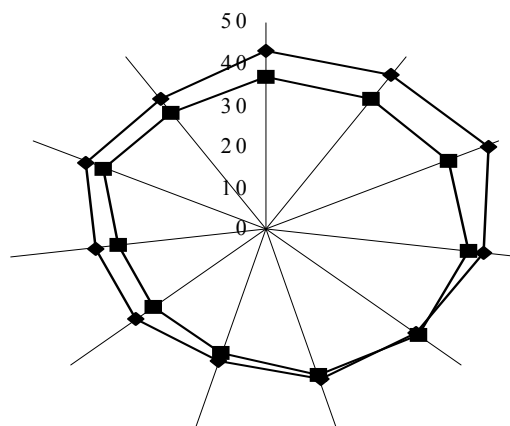
- wzdłuż długości silnika (Rys. 3)
- na obwodzie silnika (Rys. 4)
- na wysokości żebra
- strony żebra – zawietrznej czy nawietrznej (Rys. 6)



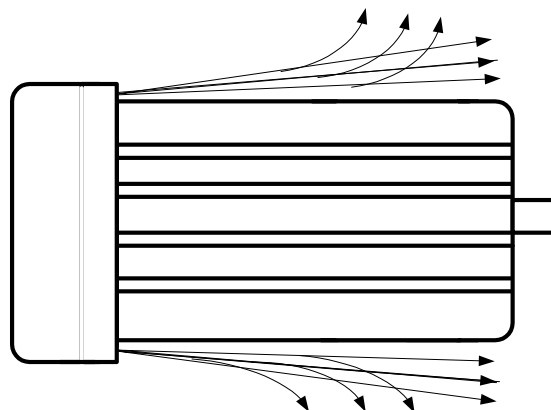
Rys. 3 Rozkład temperatury wzdłuż kadłuba

Zmiany te wynikają z następujących powodów:

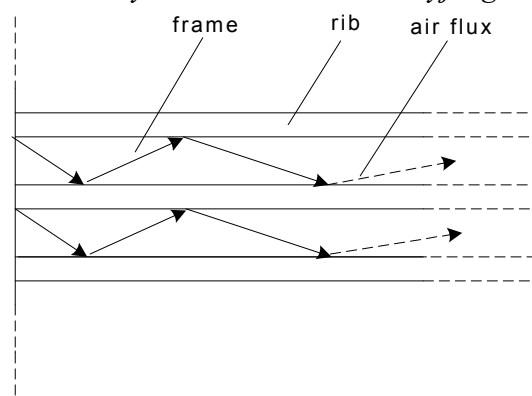
- ucieczki części strumienia powietrza omywającego ożebrowany kadłub (Rys. 5) przez co prędkość powietrza zmienia się wzdłuż kadłuba silnika
- nierównomiernego rozkładu prędkości powietrza wzdłuż wysokości żeber
- odbijanie się powietrza od żeber wskutek osiowo-tangencjalnego wylotu powietrza spod osłony wentylatora (Rys. 6)



Rys. 4 Rozkład temperatury po obwodzie kadłuba w płaszczyźnie prostopadłej do osi silnika



Rys. 5 Ucieczka powietrza chłodzącego ożebrowany kadłub silnika indukcyjnego



Rys. 6 Odbicia powietrza chłodzącego od żeber kadłuba

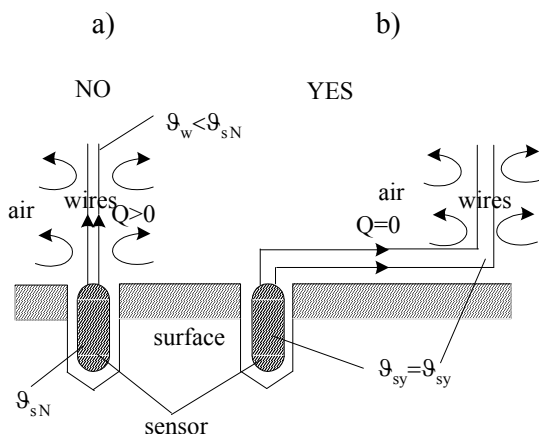
- różnej gęstości strumienia ciepłego dopływającego do kadłuba z części stykającej się z rdzeniem i z części nadczołowej

e) cieplnej niesymetrii obwodowej kadłuba (łapy przylegające do ławy, skrzynka przyłączeniowa, ucho itp.)

Jak widać na Rys. 3 i 4 temperatura kadłuba zmienia się w szerokim zakresie. Stosunek minimalnego przyrostu temperatury kadłuba do maksymalnego na Rys. 3 ma się jak 1:4. Zmienia się również temperatura tarcz łożyskowych i jest różna dla obu tarcz.

W związku z tym do pomiaru średniego przyrostu temperatury kadłuba należy wbudować większą liczbę czujników, które umożliwią obliczenie średniej wartości odpowiedniej części kadłuba. W przypadku pomiaru lokalnej wartości temperatury należy precyzyjnie podać lokalizację spiny termoelementu.

Istotny jest sposób wbudowania spiny termoelementu i umieszczenia części przewodów termoelementu zbliżonej do spiny. Część przewodu zbliżona do spiny winna przylegać do kadłuba, w ten sposób nie ma spadku temperatury wzdłuż przewodu i spoina ma temperaturę punktu pomiarowego. Sama spoina powinna być odpowiednio umieszczona poniżej powierzchni kadłuba. Jeśli przewody termoelementu są prostopadłe do powierzchni wówczas są one chłodzone przez powietrze i odprowadzają ciepło od spiny.



Rys. 7 Sposób wbudowania termoelementów na powierzchni kadłuba a) zły b) dobry

## 6. Wnioski

a) Poprawność obliczeń cieplnych wynika nie tylko od użytej metody obliczeń cieplnych, lecz także od:

- Dokładności obliczeń elektromagnetycznych – obliczeń strat i ich lokalizacji
  - Obliczeń wentylacyjnych – wydatków i prędkości powietrza chłodzącego
  - Rozrzutu produkcyjnego
  - Wartości przyjętych parametrów materiałowych
- b) Nie każdy pomiar jest wystarczającym kryterium do stwierdzenia poprawności obliczeń cieplnych, dopiero odpowiednio przeprowadzony pomiar jest miarodajny.
- c) Zgodność pomierzonego i obliczonego przyrostu temperatury uzwojenia jeszcze nie świadczy o poprawności obliczeń. O zgodności wyników można mówić, wówczas, gdy rozkład temperatury pomierzonej i obliczonej całej maszyny są jednakowe. Może się bowiem zdarzyć, że porównywane temperatury uzwojenia stojana są jednakowe, a temperatury kadłuba są różne, co znaczy, że różne części maszyny są źle obliczone.
- d) Przy pomiarze średniej temperatury powierzchni za pomocą czujników wbudowanych należy zainstalować odpowiednio dużą liczbę termoelementów, aby pomiar był miarodajny.
- e) Przy podawaniu wyników pomiarów należy przedstawić sposób zainstalowania czujników i ich lokalizację.
- f) Należy porównywać nie tylko średnie przyrosty temperatur, lecz także innych części maszyny.
- g) Należy zwracać uwagę na wartość strat występujących przy badaniach i obliczeniach.

## 7. Literatura

[1] "Rotating Electrical Machines", Part 1, Rating and Performance", *International Standard IEC 60034-1* Edition 10.2 1999-08.

[2] „Measurement of the Winding Resistance of an AC Machine during Operation at Alternating Voltage” *International Standard IEC 60279:1969*,

[3] Mukosiej J.; Zapaśnik R.: *Badania cieplne I wentylacyjne maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa, 1964, str. 244.

[4] Mukosiej J.: “*Modified Equivalent Thermal Network for Calculation of Induction Motors in Thermal Steady State*”, Prace Instytutu Elektrotechniki Nr.195, 1997, str. 7-92.

[5] Zapaśnik, R.: „*Bestimmung der Ubertemperatur der Ständerwicklungen von Induktionsmotoren nach dem Widerstands-Superpositionsverfahren*” *Proceedings of the XII<sup>th</sup> Intern. Wiss. Koll. TH Ilmenau*”, (In German) Ilmenau, Germany, 1968, str. 65-70.

### **Autorzy**

Dr inż. Jerzy Mukosiej  
Instytut Elektrotechniki  
Zakład Maszyn Elektrycznych  
04-703 Warszawa  
Ul. Pożaryskiego 28  
E-mail: mukosiej@iel.waw.pl

### **Recenzent**

*Prof. dr hab. inż. Mirosław Dąbrowski*