

Model matematyczny do badań cieplnych dwubiegowych silników górniczych

Roman Krok, Janusz Wróblewski

1. Wstęp

W silnikach indukcyjnych dwubiegowych przeznaczonych do pracy w podziemiach kopalń stosowane jest wodne chłodzenie kadłubów oraz tarcz łożyskowych. Z pomiarów cieplnych tego typu silników wynika, że w poszczególnych elementach konstrukcyjnych występują znaczne nierównomierności rozkładu temperatury. Najbardziej narażonymi na uszkodzenia termiczne elementami silnika dwubiegowego są uzwojenia stojana, w których przy znamionowym obciążeniu silnika różnica pomiędzy maksymalną a minimalną temperaturą (w zależności od mocy i typu silnika) osiąga wartość nawet kilkunastu °C. Stosowanie w obliczeniach projektowych [1, 5] tych silników uproszczonych modeli cieplnych, umożliwiających jedynie obliczenie średnich temperatur elementów, nie pozwala w pełni określić stopnia wykorzystania cieplnego poszczególnych jego elementów. Przeprowadzenie takiej oceny wymaga znajomości maksymalnych temperatur podstawowych elementów konstrukcyjnych silnika dwubiegowego w znamionowych warunkach zasilania i obciążenia.

W ramach prowadzonej pracy badawczej opracowano zwyfikowany pomiarowo model cieplny dwubiegowych silników indukcyjnych z wodnym chłodzeniem kadłubów oraz tarcz łożyskowych po stronie przeciwnapędowej. Model ten umożliwia obliczenie rozkładów temperatury we wszystkich elementach konstrukcyjnych. Można go wykorzystać w procesie projektowania silników dwubiegowych. Z jego pomocą można wykonywać symulacyjne badania cieplne silników, co jest szczególnie istotne w przypadku rozpatrywanej grupy dwubiegowych silników górniczych dużej mocy, produkowanych zwykle w krótkich seriach, z uwzględnieniem indywidualnych wymagań klientów. Opracowany program komputerowy

🇬🇧 MATHEMATICAL MODEL FOR THERMAL INVESTIGATIONS OF TWO-SPEED MINE MOTORS

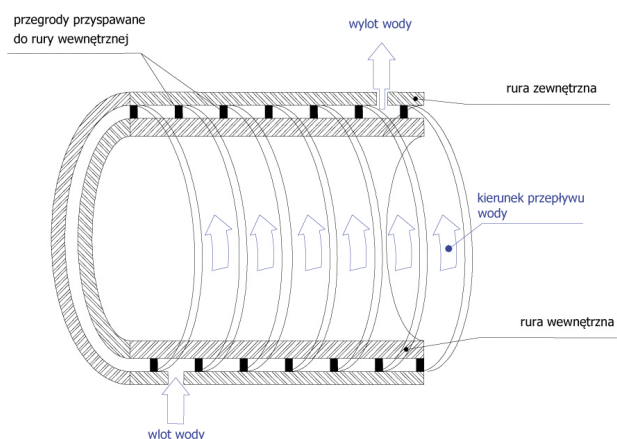
Abstract: The paper presents a thermal model of two-speed induction motors with water-cooled frames. This model is made basing on the method of finite differences with the use of interpretation of the heat conduction equations in the form of thermal-electrical networks. It enables calculating temperature distributions in all constructional elements of induction motor and in the stream of water flowing in the frame as well as in the streams of air flowing in ventilation ducts of the rotor core and the frame. Basing on the model, a computer program that can be used for computer aided design is developed. Exemplary thermal calculations are carried out for the two-speed induction motor of 85/250 kW. The results obtained from simulations are compared with those from thermal measurements.

umożliwia obliczenie rozkładów temperatury w elementach konstrukcyjnych silnika dwubiegowego w różnych warunkach występujących podczas eksploatacji w podziemiach kopalń.

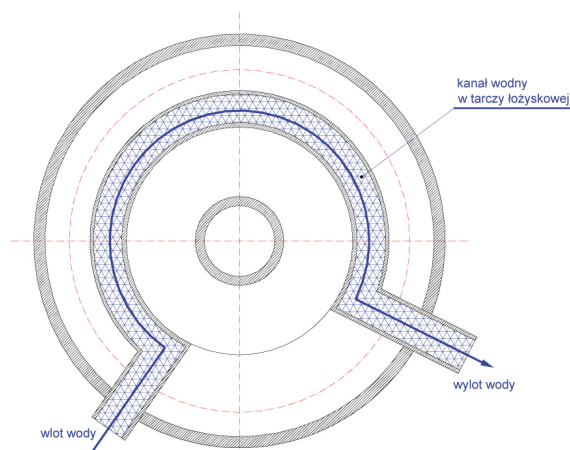
2. System chłodzenia dwubiegowych silników górniczych

Model cieplny opracowano dla dwubiegowych silników indukcyjnych (rys. 1–3) ze spiralnym kanałem wodnym w kadłubie oraz dodatkowym kanałem wodnym w tarczy łożyskowej po stronie przeciwnapędowej.

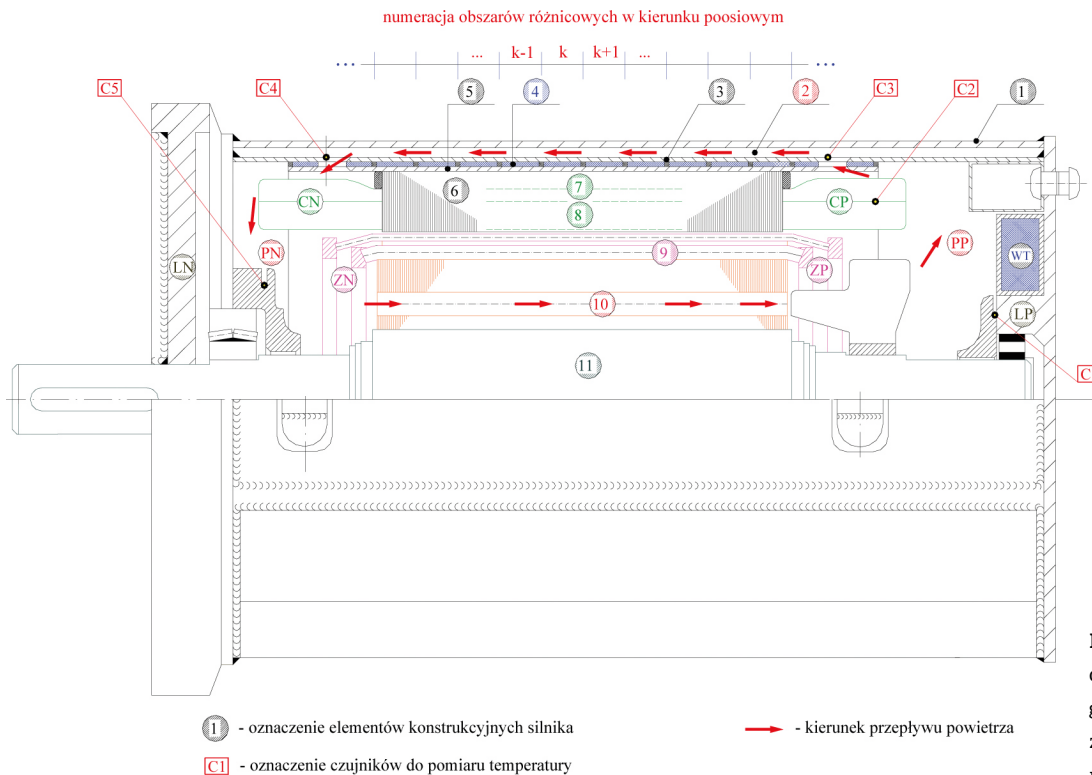
W rozpatrywanym typie dwubiegowych silników górniczych wlot wody do kadłuba znajduje się po stronie napędowej, zaś



Rys. 1. Przepływ wody w kadłubie silnika



Rys. 2. Tarcza łożyskowa po stronie przeciwnapędowej chłodzona wodą



Rys. 3. Przekrój podłużny dwubiegowego silnika górniczego z wprowadzoną numeracją elementów

wylot po stronie przeciwnapędowej. Obszar, w którym przepływa woda wewnątrz kadłuba, ograniczony jest dwiema rurami, zaś przepływ wody po torze spiralnym odbywa się dzięki przegrodom przyspawanym do rury wewnętrznej. Woda po schłodzeniu kadłuba wpływa do kanału chłodzącego (rys. 2), znajdującego w tarczy łożyskowej po stronie przeciwnapędowej. Z kanału wodnego w tarczy łożyskowej woda wyprowadzana jest na zewnątrz silnika.

W rozpatrywanej grupie dwubiegowych silników górniczych zastosowano dodatkową wewnętrzną cyrkulację powietrza chłodzącego wewnętrzne elementy silnika (na rys. 3 strzałkami oznaczono kierunki przepływu powietrza), wymuszoną przez osadzony na wale po stronie przeciwnapędowej wentylator. Powietrze chłodzi się, przepływając kanałami poosiowymi w chłodnicy wodnej w kadłubie, oraz nagrzewa się, przepływając kanałami poosiowymi w pakiecie blach wirnika.

Elementy konstrukcyjne dwubiegowego silnika górniczego (rys. 3), dzielone przy opracowywaniu modelu cieplnego na obszary różnicowe, ponumerowano:

- osłona ognioszczelna (obudowa silnika) – 1;
- poosiowe powietrzne kanały wentylacyjne w kadłubie – 2;
- rura zewnętrzna (patrz również rys. 1) w chłodnicy wodnej w kadłubie – 3;
- spiralny kanał wodny w kadłubie – 4;
- rura wewnętrzna (patrz również rys. 1) w chłodnicy wodnej w kadłubie – 5;
- pakiet blach stojana – 6;
- część żłobkowa uzwojenia stojana o liczbie biegunów $2p = 4 - 7$;
- część żłobkowa uzwojenia stojana o liczbie biegunów $2p = 12 - 8$;

- pręty klatki wirnika – 9;
- poosiowe powietrzne kanały chłodzące w pakiecie blach wirnika – 10;
- wał wraz z pakietem blach wirnika – 11.

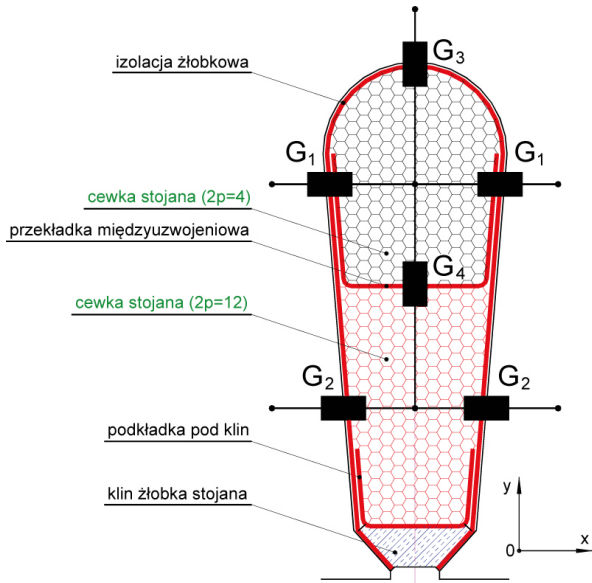
Pozostałych elementów silnika biorących udział w wymianie ciepła, oznaczonych na rys. 3 symbolami, nie dzielono na obszary różnicowe, zaś przy sporządzaniu schematu cieplno-elektrycznego przyporządkowano im po jednym węźle.

3. Model cieplny dwubiegowych silników górniczych chłodzonych wodą

W celu opracowania modelu cieplnego dwubiegowego silnika górniczego [2, 3] jego elementy konstrukcyjne podzielono (rys. 3) w kierunku poosiowym na obszary różnicowe. Poszczególnym obszarom różnicowym przyporządkowano węzły schematu cieplnego, reprezentujące ich średnie temperatury. Zawierająca 177 węzłów sieć cieplno-elektryczna (rys. 5) odwzorowuje zjawiska wymiany ciepła zachodzące pomiędzy sąsiadującymi obszarami różnicowymi na skutek przewodzenia ciepła oraz wnikania ciepła do strug wody i powietrza.

W opracowanym modelu cieplnym dwubiegowego silnika górniczego uwzględniono:

- przepływy ciepła z zasilanego uzwojenia stojana (uzwojenia o liczbie biegunów $2p = 4$ lub $2p = 12$) zarówno do drugiego uzwojenia umieszczonego w żłobkach stojana, jak i do pakietu blach stojana i powietrza otaczającego czoła uzwojenia;
- przepływy ciepła w elementach silnika w kierunku poosiowym i promieniowym;
- różne wartości przewodności cieplnych właściwych pakietów blach stojana i wirnika w kierunkach poosiowym i promieniowym;

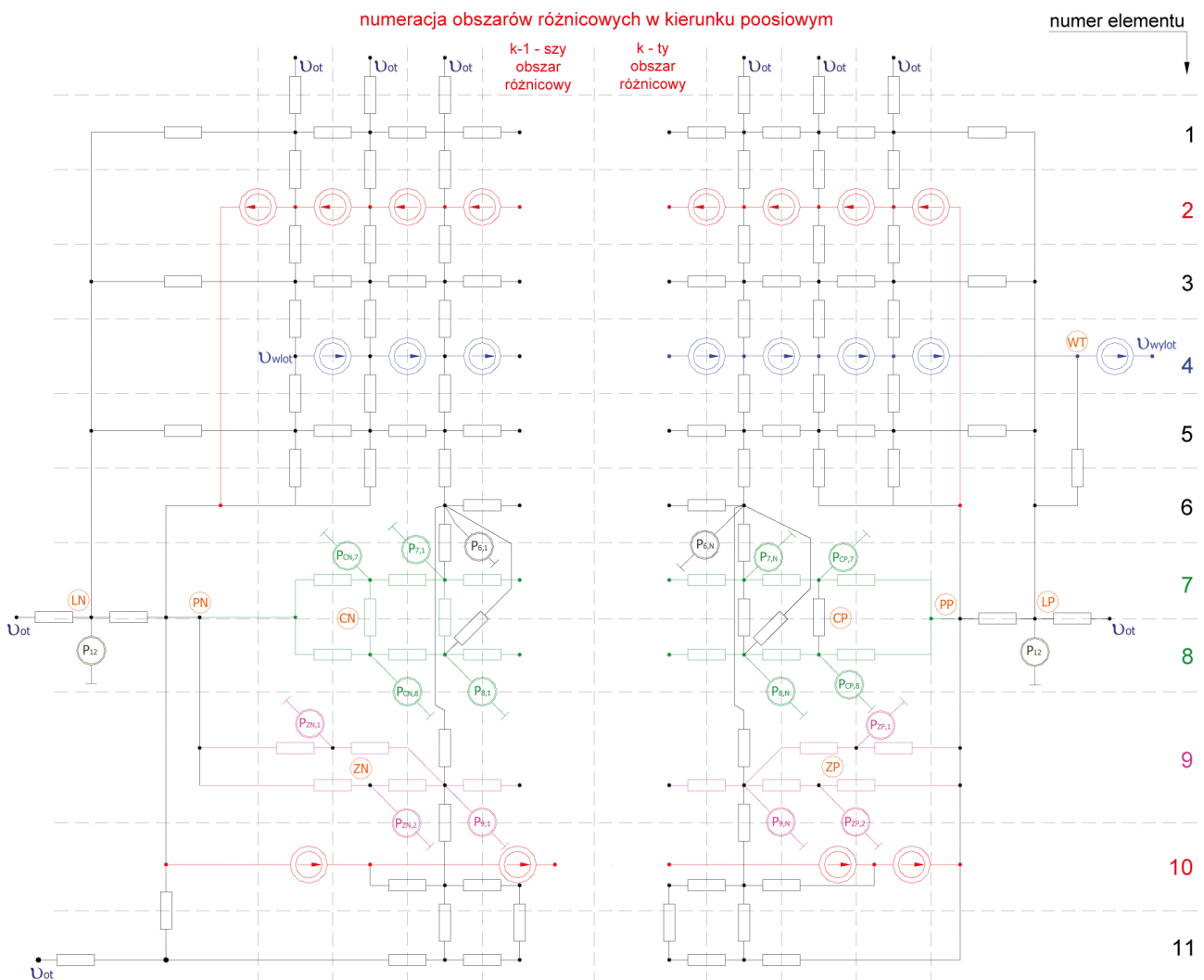


Rys. 4. Sieć cieplno-elektryczna odwzorowująca wymianę ciepła w obrębie żłobków stojana

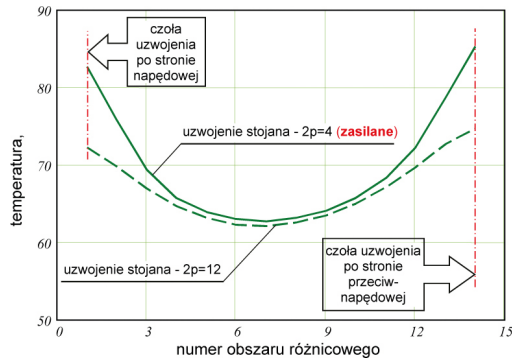
- zjawiska unoszenia ciepła w strudze wody i w strugach powietrza przepływającego w kanałach chłodzących w kadłubie i w pakiecie blach wirnika;
- zmiany temperatury mediów chłodzących (woda i powietrze) występujące wzdłuż kierunku ich przepływu;
- straty w uzwojeniu stojana, klatce wirnika, pakiecie blach stojana oraz w łożyskach;
- wnikanie ciepła z powierzchni elementów znajdujących się wewnątrz silnika do powietrza wypełniającego wnętrze maszyny oraz wnikanie ciepła z osłony ognioszczelnej i tarcz łożyskowych do powietrza w otoczeniu silnika na skutek konwekcji i promieniowania.

Sporządzając model cieplny silnika, założono, że przewodności cieplne właściwe materiałów, z których wykonane są jego elementy, oraz współczynniki wnikania ciepła z powierzchni omywanych przez media chłodzące są stałe.

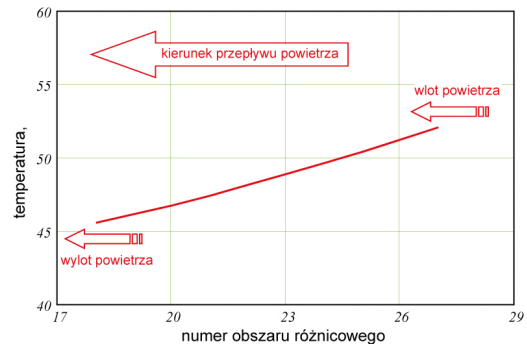
Opracowując sieć cieplno-elektryczną dla dwubiegowych silników górniczych, postępowano w analogiczny sposób, jak przy sporządzaniu modeli cieplnych [2, 3] silników jednobiegowych. Jednym z nowych zagadnień było wydzielenie strumieni ciepła przepływających w częściach żłobkowych dwóch oddzielnych



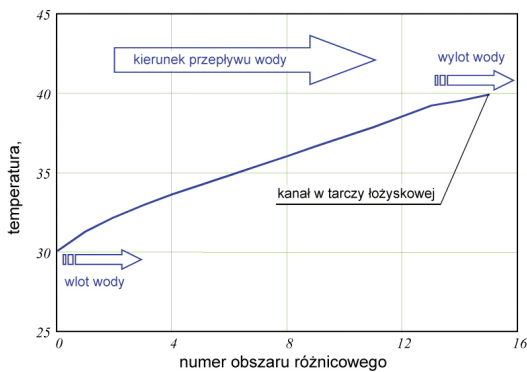
Rys. 5. Model cieplny dwubiegowego silnika górniczego chłodzonego wodą



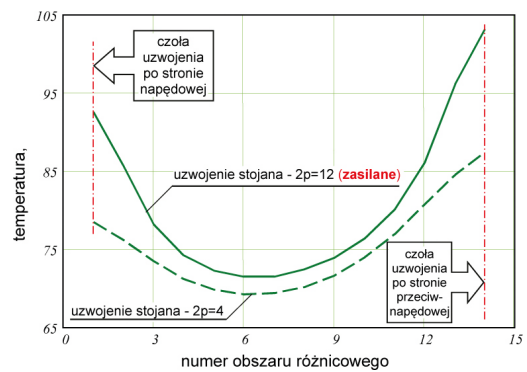
Rys. 6. Poosiowe rozkłady temperatury w uzwojeniach stojana przy zasilaniu uzwojenia o liczbie biegunów $2p = 4$ napięciem znamionowym i obciążeniu silnika znamionową mocą użyteczną



Rys. 8. Poosiowy rozkład temperatury w strudze powietrza przepływającego w chłodnicy wodnej w kadłubie przy zasilaniu uzwojenia o liczbie biegunów $2p = 4$ napięciem znamionowym i obciążeniu silnika znamionową mocą użyteczną



Rys. 7. Poosiowy rozkład temperatury w strudze wody chłodzącej przy zasilaniu uzwojenia o liczbie biegunów $2p = 4$ napięciem znamionowym i obciążeniu silnika znamionową mocą użyteczną



Rys. 9. Poosiowe rozkłady temperatury w uzwojeniach stojana przy zasilaniu uzwojenia o liczbie biegunów $2p = 12$ napięciem znamionowym i obciążeniu silnika znamionową mocą użyteczną

uzwojeń umieszczonych w żłobkach stojana, a następnie przypisanie im (rys. 4) odpowiednich przewodności cieplnych.

4. Symulacyjne badania cieplne dwubiegunowego silnika górniczego o mocy 85/250 kW

Przykładowe obliczenia cieplne wykonano dla dwubiegunowego silnika indukcyjnego chłodzonego wodą o danych znamionowych: $P_n = 85/250$ kW, $U_n = 1000$ V, $I_n = 106/176$ A, $n_n = 492/1483$ obr./min.

Obliczenia te wykonano z pomocą opracowanego programu komputerowego dla znamionowego stanu zasilania i obciążenia silnika oraz występujących podczas pomiarów cieplnych następujących warunków chłodzenia: wydatek wody chłodzącej – $Q = 12$ dm³/min, temperatura wlotowa wody chłodzącej – $\vartheta_{wlot} = 30^\circ\text{C}$, temperatura otoczenia – $\vartheta_{ot} = 21^\circ\text{C}$. Badania symulacyjne i pomiary cieplne wykonano oddzielnie dla dwóch przypadków pracy silnika, w których zasilane jest uzwojenie stojana o liczbie biegunów $2p = 4$ lub o liczbie biegunów $2p = 12$.

Na rys. 6–8 zamieszczono obliczone rozkłady temperatury w uzwojeniach stojana oraz w strugach wody i powietrza przepływającego w kanałach w kadłubie przy zasilaniu uzwojenia stojana o liczbie biegunów $2p = 4$ napięciem znamionowym U_n i przy obciążeniu silnika znamionową mocą użyteczną P_n .

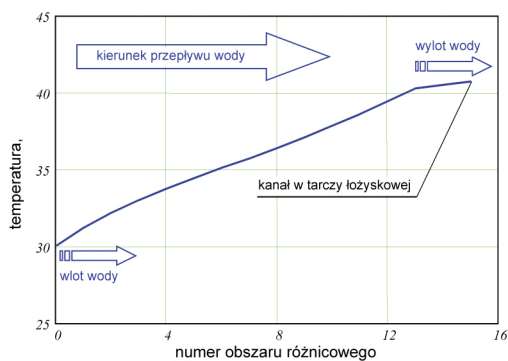
Obliczona średnia temperatura zasilanego uzwojenia stojana o liczbie biegunów $2p = 4$ wynosi $77,0^\circ\text{C}$, zaś temperatura czół uzwojenia stojana po stronie przeciwnapędowej w miejscu zainstalowania czujnika C_2 (rys. 3) wynosi $79,9^\circ\text{C}$.

Na rys. 9–11 zamieszczono obliczone rozkłady temperatury w uzwojeniach stojana oraz w strugach wody i powietrza przepływającego w kanałach w kadłubie przy zasilaniu uzwojenia stojana o liczbie biegunów $2p = 12$ napięciem znamionowym U_n i przy obciążeniu silnika znamionową mocą użyteczną P_n .

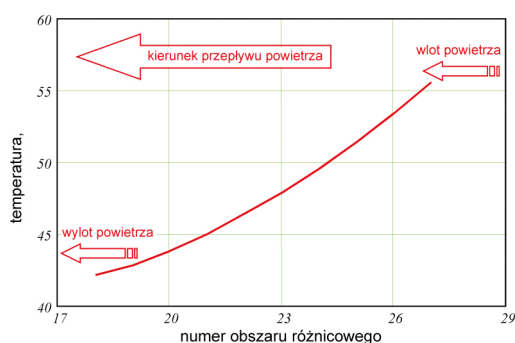
Obliczona średnia temperatura zasilanego uzwojenia stojana o liczbie biegunów $2p = 12$ wynosi $88,2^\circ\text{C}$, zaś temperatura czół uzwojenia stojana po stronie przeciwnapędowej w miejscu zainstalowania czujnika C_2 (rys. 3) wynosi $95,2^\circ\text{C}$.

W tabelach 1 i 2 porównano wyniki symulacyjnych badań cieplnych silnika dwubiegunowego o mocy 85/250 kW z wynikami pomiarów udostępnionych przez producenta.

Podczas pomiarów cieplnych silników górniczych standardowo mierzona jest metodą rezystancyjną [4] średnia temperatura uzwojenia stojana oraz temperatura czół uzwojenia stojana po stronie przeciwnapędowej czujnikiem Pt100. Zabudowanie przez producenta wewnątrz badanego dwubiegunowego silnika górniczego dodatkowych czujników do pomiaru temperatur mediów chłodzących (woda i powietrze) umożliwiło



Rys. 10. Poosiowy rozkład temperatury w strudze wody chłodzącej przy zasilaniu uzwojenia o liczbie biegunów $2p = 12$ napięciem znamionowym i obciążeniu silnika znamionową mocą użyteczną



Rys. 11. Poosiowy rozkład temperatury w strudze powietrza przepływającego w chłodnicy wodnej w kadłubie przy zasilaniu uzwojenia o liczbie biegunów $2p = 12$ napięciem znamionowym i obciążeniu silnika znamionową mocą użyteczną

rozszerzenie zakresu przeprowadzonej weryfikacji pomiarowej wyników badań symulacyjnych.

Maksymalna niedokładność odwzorowania temperatur wewnątrz silnika (w elementach konstrukcyjnych oraz w mediach chłodzących) przez opracowany model cieplny (tabele 1 i 2) nie przekracza 8°C , zaś w odniesieniu do uzwojenia stojana (najbardziej interesującego elementu konstrukcyjnego z punktu widzenia oceny żywotności izolacji oraz zagrożeń termicznych) niedokładność ta jest jeszcze mniejsza i nie przekracza $6,5^{\circ}\text{C}$.

Wnioski końcowe

Opracowany model cieplny dwubiegunowych silników górniczych zapewnia wystarczającą w zastosowaniach praktycznych dokładność odwzorowania temperatur elementów konstrukcyjnych oraz mediów chłodzących. Może on więc być zastosowany w systemach komputerowego wspomaganie projektowania dwubiegunowych silników górniczych oraz przy doborze nastawień ich zabezpieczeń termicznych.

Literatura

- [1] DĄBROWSKI M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT, Warszawa 1994.
- [2] KROK R., WRÓBLEWSKI J.: *Badania wpływu zmian warunków chłodzenia na stan cieplny silników indukcyjnych pracujących*

Tabela 1. Weryfikacja pomiarowa wyników obliczeń silnika dwubiegunowego przy zasilaniu uzwojenia stojana o liczbie biegunów $2p = 4$

L.p.	Wielkość	Pomiar	Obliczenia
1	Średnia temperatura zasilanego uzwojenia stojana	$74,0^{\circ}\text{C}$	$77,0^{\circ}\text{C}$
2	Temperatura czół uzwojenia stojana (czujnik C_2 - rys. 3)	$81,4^{\circ}\text{C}$	$79,9^{\circ}\text{C}$
3	Temperatura wylotowa wody chłodzącej (na wylocie z kanału w tarczy łożyskowej)	$44,0^{\circ}\text{C}$	$39,9^{\circ}\text{C}$
4	Temperatura powietrza na wlocie do chłodnicy (czujnik C_3 - rys. 3)	$52,0^{\circ}\text{C}$	$52,0^{\circ}\text{C}$
5	Temperatura powietrza na wylocie z chłodnicy (czujnik C_4 - rys. 3)	$48,0^{\circ}\text{C}$	$45,6^{\circ}\text{C}$
6	Temperatura tarczy łożyskowej od strony napędowej (czujnik C_5 - rys. 3)	$53,6^{\circ}\text{C}$	$54,5^{\circ}\text{C}$
7	Temperatura tarczy łożyskowej od strony przeciwnapędowej (czujnik C_1 - rys. 3)	$37,0^{\circ}\text{C}$	$43,1^{\circ}\text{C}$

Tabela 2. Weryfikacja pomiarowa wyników obliczeń silnika dwubiegunowego przy zasilaniu uzwojenia stojana o liczbie biegunów $2p = 12$

L.p.	Wielkość	Pomiar	Obliczenia
1	Średnia temperatura zasilanego uzwojenia stojana	$81,9^{\circ}\text{C}$	$88,2^{\circ}\text{C}$
2	Temperatura czół uzwojenia stojana (czujnik C_2 - rys. 3)	$93,2^{\circ}\text{C}$	$95,2^{\circ}\text{C}$
3	Temperatura wylotowa wody chłodzącej (na wylocie z kanału w tarczy łożyskowej)	$40,2^{\circ}\text{C}$	$40,8^{\circ}\text{C}$
4	Temperatura powietrza na wlocie do chłodnicy (czujnik C_3 - rys. 3)	$51,0^{\circ}\text{C}$	$55,6^{\circ}\text{C}$
5	Temperatura powietrza na wylocie z chłodnicy (czujnik C_4 - rys. 3)	$40,0^{\circ}\text{C}$	$42,1^{\circ}\text{C}$
6	Temperatura tarczy łożyskowej od strony napędowej (czujnik C_5 - rys. 3)	$47,4^{\circ}\text{C}$	$52,8^{\circ}\text{C}$
7	Temperatura tarczy łożyskowej od strony przeciwnapędowej (czujnik C_1 - rys. 3)	$34,7^{\circ}\text{C}$	$42,6^{\circ}\text{C}$

w podziemiach kopalń. XIII Seminarium techniczne „Problemy Eksploatacji Maszyn Elektrycznych i Napędów Elektrycznych – Eksploatacja, diagnostyka i modernizacja silników elektrycznych”, 19–21.05.2004, Ustroń Jaszowiec, „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” BOBRME Nr 68, Katowice 2004.

- [3] KROK R.: *Model do obliczeń pól temperatury w silnikach indukcyjnych z kadłubami chłodzonymi wodą*. 39th International Symposium on Electrical Machines, SME'2003, 9–11 June 2003, Gdańsk – Jurata.
- [4] LATEK W.: *Badania maszyn elektrycznych w przemyśle*. WNT, Warszawa 1987.
- [5] MUKOSIEJ J.: *Zmodyfikowana zastępcza sieć cieplna do obliczeń silników indukcyjnych w stanie cieplnie ustalonym*. Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 195, Warszawa 1997.

dr hab. inż. Roman Krok, prof. PŚ. – Katedra Elektrotechniki i Informatyki;
mgr inż. Janusz Wróblewski – Dąbrowska Fabryka Maszyn Elektrycznych DAMEL S.A.

artykuł recenzowany