

Dariusz Gurazdowski, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ROZKŁAD TEMPERATURY W PRĘCIE UZWOJENIA STOJANA TURBOGENERATORA

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF TURBOGENERATOR STATOR WINDING BAR

Abstract: This paper presents the mathematical model of thermal spread within stator winding bar in active part as well as the result of the calculation carried out by using this model. This model was created to take advantage of the heat diagram method. It was necessary to split winding bar into parts, inside which temperature is constant. In this way the substitute heat diagram has been obtained according to rules of electrical diagram. The results presented by this paper are applied to two cases of phase distribution inside the calculated slot. First case, the top and bottom bar has the same phase inside slot (slot number 1), for which temperature distribution is computed. Second case, bars belong to different phase (slot number 9). The computations were made for selected type of turbogenerator with indirectly cooled system and radial ventilation ducts. On the basis of running test result of this machine, the thermal model verification was carried out. The calculated temperature of spacer was checked with measurements.

1. Wstęp

Rozpoznanie pola temperaturowego ma istotne znaczenie w prognozowaniu uszkodzeń termicznych i termomechanicznych. W dużych generatorach, z długimi prętami, wzrost temperatury miedzi i żelaza stojana prowadzi do trwałych deformacji uzwojeń w rdzeniu stojana i zmniejszenia wytrzymałości elektrycznej izolacji. Analiza rozkładu pola temperaturowego pręta uzwojenia stojana wynika z konieczności rozpoznania możliwości kształtowania temperatury, ze względu na straty dodatkowe. Straty te wywołane są głównie przez strumienie rozproszenia żłobkowego i strefy czołowej turbogeneratora.

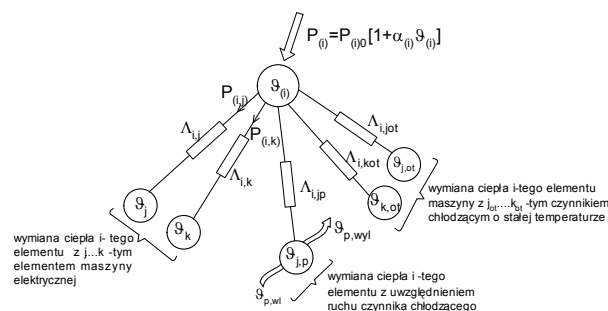
Celem pracy jest prezentacja modelu cieplnego strefy żłobkowej uzwojenia stojana turbogeneratora i pokazanie wyników obliczeń rozkładu temperatury w pręcie warstwy górnej i dolnej uzwojenia. Do wyznaczenia tego rozkładu wykorzystano tzw. metodę schematów cieplnych [3, 4, 5, 6, 7] umożliwiającą uzyskanie obrazu średnich temperatur w uzwojeniu.

2. Model cieplny

2.1. Metoda schematów cieplnych

Metoda schematów cieplnych [3, 4, 5, 6, 7] pozwala wyznaczyć rozkład temperatury w pręcie uzwojenia stojana turbogeneratora o pośrednim systemie chłodzenia. Wymaga to podziału rozpatrywanego pręta uzwojenia na obszary, wewnątrz których temperatura jest stała. Otrzy-

muje się w ten sposób cieplny schemat zastępczy pręta, wzorowany na schemacie elektrycznym. Zastępczy schemat cieplny maszyny elektrycznej, złożony z „n” węzłów cieplnych źródłowych zależnych od temperatury $P = P_{i0} [1 + \alpha_{(i)} \vartheta_{(i)}]$, które powiązane są z innymi elementami maszyny przewodnościami cieplnymi $\Lambda_{(i,j)}$ oraz czynnikiem chłodzącym $\Lambda_{(i,jot)}$ przedstawiono na rysunku 1 [6].

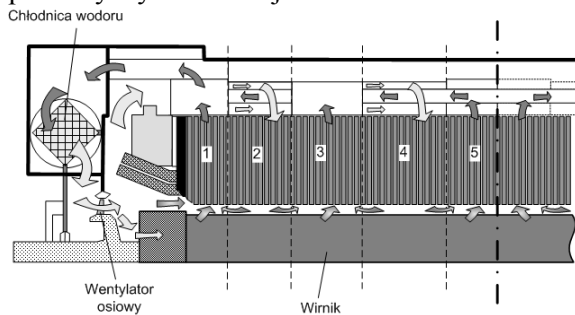


Rys.1. Ciepły schemat zastępczy i-tego elementu maszyny elektrycznej

W modelu cieplnym uwzględniono również rozptyw czynnika chłodzącego zarówno wzdłuż długości maszyny jak i w kanałach wentylacyjnych. Analizę tego rozptywu dokonano na podstawie modelu wentylacyjnego maszyny [4, 7].

2.2. Wentylacja turbogeneratora

W turbogeneratorze układ wentylacyjny (rys. 2) jest symetryczny względem płaszczyzny przechodzącej prostopadle do osi wału w połowie długości maszyny. Zarówno pakiety blach jak i pręty uzwojenia stojana chłodzone są gazem (wodorem) przepływającym przez promieniowe kanały wentylacyjne w równoległych strugach. W połowie długości rdzenia badanego turbogeneratora występuje pięć równoległych strug rozłożonych w pięciu komorach wentylacyjnych. Z tego wynika nazwa takiego systemu wentylacyjnego - pięciokomorowy system chłodzenia. Strugi gazu płyną pod wpływem ciśnienia wytworzonego przez wentylacyjne działanie beczki wirnika i zamocowanych osiowo na wirniku dwóch wentylatorów. Konfiguracja drogi przepływu tych strug jest symetryczna z każdego końca maszyny w kierunku płaszczyzny środkowej.



Rys. 2. Przepływ czynnika chłodzącego w turbogeneratorze o pięciokomorowym systemie chłodzenia

Droga przepływu gazu rozpoczyna się od miejsca wylotu z chłodnicy. Następnie, po przejściu przez wentylator rozdziela się na trzy główne strugi (rys. 2). Pierwsza wpływa do szczeliny powietrznej. Druga przepływa przez przeloty między połączeniami czołowymi, chłodzi te połączenia, przechodzi do komory połączeń czołowych i dalej przechodzi do przestrzeni pomiędzy pakietem blach i zewnętrznym płaszczem maszyny. Trzecia wpływa do wirnika w obszarze pozazłobkowym między kołpakiem a wałem, znajdując dostęp do wydrążonych w uzwojeniu (prętach elementarnych) kanałów oraz do podźłobków umieszczonych bezpośrednio pod głównymi żłobkami wirnika. Ze względu na układ wentylacyjny pręty warstwy górnej i dolnej podzielono w modelu cieplnym na tzw. sekcje cieplne. Dla każdej sekcji zbudowano sieć cieplną uwzględniającą źródła cie-

pła oraz rozptyw czynnika chłodzącego w kanałach wentylacyjnych.

2.3. Podział pręta uzwojenia stojana

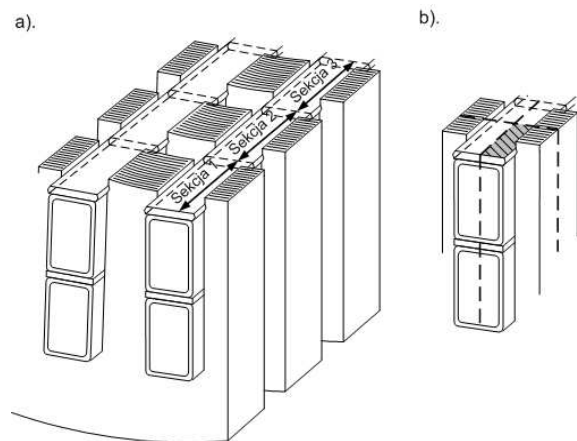
Podział pręta na sekcje (rys. 3) wynika z podziału maszyny na kanały wentylacyjne oraz możliwości utworzenia sieci cieplnej dla każdej sekcji na podstawie metody schematów cieplnych. Liczba sekcji (m_s) równa się liczbie kanałów wentylacyjnych (m_k) minus jeden (1).

$$m_s = m_k - 1 \quad (1)$$

gdzie:

m_s – liczba sekcji

m_k – liczba kanałów wentylacyjnych

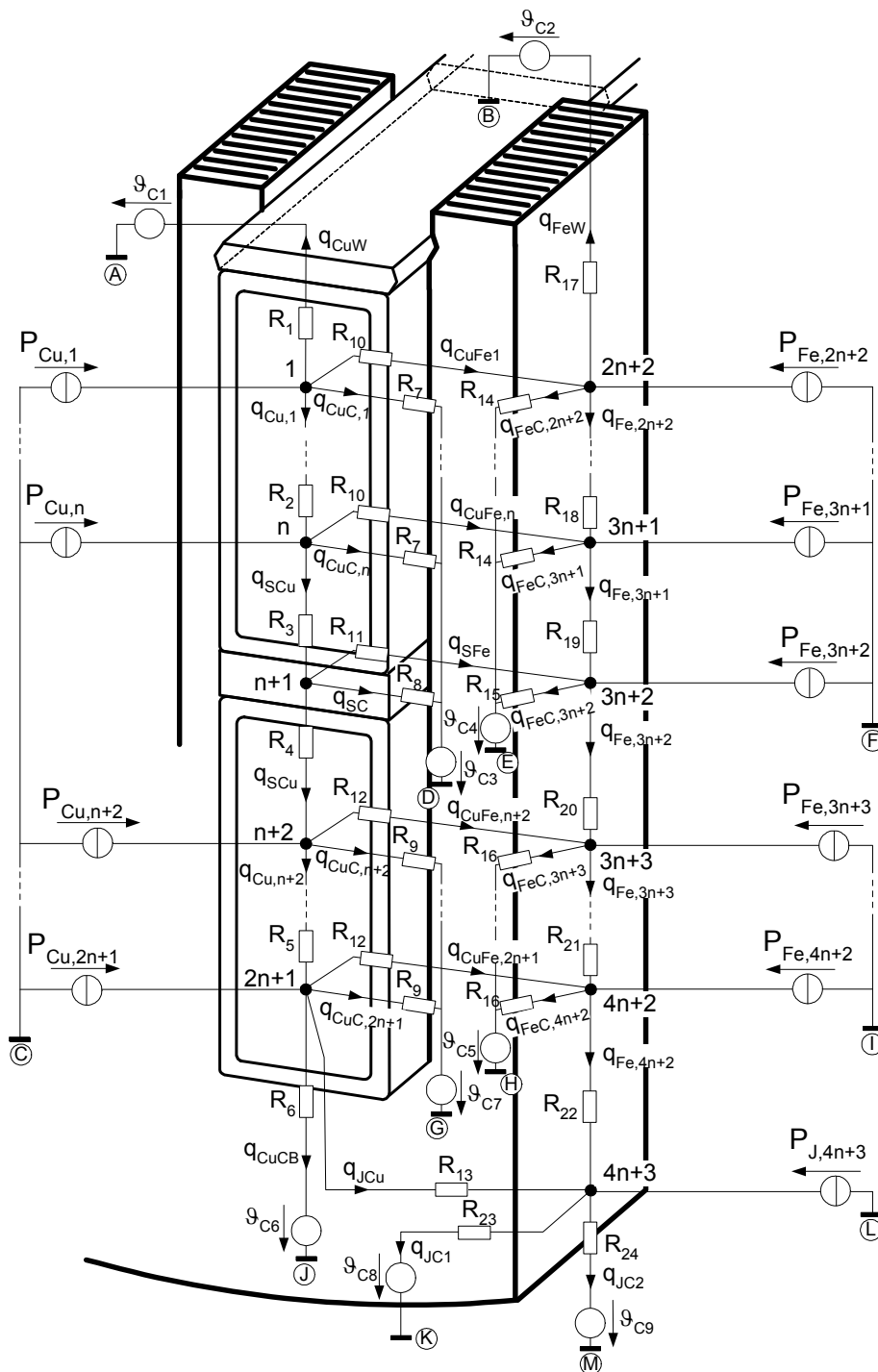


Rys. 3. Podział pręta uzwojenia stojana turbogenerators: a) podział na sekcje cieplne, b) podział sekcji cieplnej na strefy

Sekcja obejmuje pakiet blach wraz z połową kanału wentylacyjnego otaczającego ten pakiet z lewej i prawej strony. W połowie każdej sekcji następuje symetryczny rozptyw ciepła względem płaszczyzny równoległej i prostopadłej do boku prętów (rys. 3b). Dzięki temu model cieplny każdej sekcji utworzony jest na podstawie rozptywu ciepła w jej ćwiartce. Ćwiartkę taką nazwano strefą.

2.4. Schemat cieplny

Zgodnie z metodą schematów cieplnych wybraną strefę każdej sekcji podzielono na tzw. obszary reprezentowane za pomocą węzłów cieplnych. Temperatura wewnątrz każdego obszaru jest stała i odpowiada temperaturze węzła cieplnego przypisanego do danego obszaru. Otrzymuje się w ten sposób cieplny schemat zastępczy (rys. 4) pręta uzwojenia stojana, odwzorowany za pomocą schematu elektrycznego.



Rys. 4. Zastępczy schemat cieplny strefy żłobkowej uzwojenia stojana turbogeneratora

Schemat ten zawiera $4n + 3$ węzłów cieplnych dla każdej sekcji, gdzie n określa liczbę węzłów w pręcie. Liczba ta jest taka sama dla każdej sekcji. Dla badanego uzwojenia w pręcie górnym i dolnym każdej sekcji zdefiniowano 12 węzłów cieplnych ($n = 12$) ułożonych w równych odstępach od siebie. Jeden węzeł cieplny umieszczono w środku przekładki między prę-

tami ($n + 1$). Natomiast dla zęba rdzenia stojana przewidziano dwadzieścia pięć węzłów ($2n + 2 \dots 4n + 2$). W schemacie zastępczym uwzględniono również przekazywanie ciepła do jarzma w postaci pojedynczego węzła numer ($4n + 3$).

Rozpływ temperatury jest rezultatem: przewodnictwa ciepła przez izolacje i rdzeń, przejmomo-

wania ciepła od przewodów i blach do czynnika chłodzącego w kanałach wentylacyjnych. W celu wyznaczenia tego rozplywu w zastępczym schemacie cieplnym zdefiniowano następujące parametry:

- straty cieplne:
 - P_{Cu} - straty cieplne wydzielane w prętach (miedzi)
 - P_{Fe} - straty cieplne wydzielane w zębem (żelazie)
 - P_j - straty cieplne wydzielane w jarzmie (żelazie)
- strumień cieplny:
 - q_{CuW} - strumień cieplny płynący między prętem górnym a szczeliną powietrzną
 - q_{FeW} - strumień cieplny płynący między zębem a szczeliną powietrzną
 - q_{CuFe} - strumień cieplny płynący między prętem a zębem
 - q_{CuC} - strumień cieplny płynący między prętem a kanałem wentylacyjnym
 - q_{FeC} - strumień cieplny płynący między zębem a kanałem wentylacyjnym
 - q_{SCu} - strumień ciepła płynący między przekładką a prętami
 - q_{SC} - strumień ciepła płynący między przekładką a kanałem wentylacyjnym
 - q_{SFe} - strumień ciepła płynący między przekładką a zębem
 - q_{Fe} - strumień cieplny płynący między węzłami zęba
 - q_{Cu} - strumień cieplny płynący między węzłami pręta
 - q_{CuCB} - strumień cieplny płynący między prętem dolnym a kanałem wentylacyjnym
 - q_{JCu} - strumień cieplny płynący między jarzmem a prętem dolnym
 - q_{JC} - strumień cieplny płynący między jarzmem a kanałem wentylacyjnym
- zastępczy opór cieplny ($R_1 \dots R_{24}$),
- temperatura czynnika chłodzącego w kanałach wentylacyjnych, szczelinie powietrznej i zewnętrznej powierzchni jarzma ($\mathcal{G}_{C1} \dots \mathcal{G}_{C9}$)

3. Wyniki obliczeń

Wykorzystując opisany model matematyczny wykonano obliczenia rozkładu temperatury zarówno wzdłuż długości, wysokości pręta warstwy górnej i dolnej, jak i w przekładce między prętami uzwojenia stojana. Obliczenia wykonano za pomocą programu komputerowego "Bar"¹ dla wybranego typu turbogeneratorsa, o pośrednim systemie chłodzenia.

W pręcie warstwy górnej zastosowano niepełny przeplot Roebela typu 0+334+0 wykonany dla 272 przewodów elementarnych ułożonych w czterech kolumnach po 68 przewodów. Natomiast pręt warstwy dolnej posiada przeplot typu 90+360+90 wykonany dla 136 przewodów ułożonych w dwóch kolumnach. Każdy z prętów podzielony został na 12 węzłów cieplnych, dla których wyznaczono przyrost temperatury.

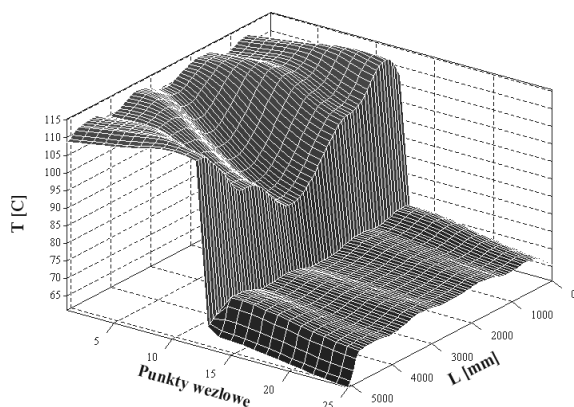
Z pomiarów przeprowadzonych podczas prób ruchowych wynika, iż przyrost temperatury ciepłego gazu na wejściu do chłodnicy wynosi 13,5 °C. W związku z tym, w obliczeniach przyjęto, iż przyrost temperatury gazu w każdym kanale wentylacyjnym, szczelinie powietrznej i na zewnątrz rdzenia jest równy przyrostowi temperatury gazu na wejściu do chłodnicy tj. 13,5 °C. Przyrost ten wyznaczono w odniesieniu do temperatury zimnego gazu, na wyjściu z chłodnicy w stanie jałowym maszyny tj. 24,7 °C. Na rysunkach 5 i 6 pokazano obliczony rozkład temperatury wzdłuż długości, wysokości pręta warstwy górnej i dolnej dla strefy żłobkowej uzwojenia oraz w przekładce między tymi prętami. W punktach węzłowych od 1 do 12 przedstawiono rozkład temperatury w pręcie górnym, punkt 13 temperaturę w przekładce między prętami, natomiast punkty od 14 do 25 rozkład temperatury pręta dolnego.

Żłobek numer 3 zawiera pręty warstwy górnej i dolnej należące do tej samej fazy, natomiast żłobek numer 18 należące do różnych faz. Z porównania rysunków 5 i 6 wynika, że przynależność prętów do tej samej lub różnych faz wpływa na wartość uzyskanych temperatur. Maksymalna temperatura pręta warstwy górnej dla żłobka numer 3 wynosi około 114 °C, dla żłobka 18 około 100 °C. Uzyskany rozkład ma nierównomierny przebieg zarówno wzdłuż długości jak i wysokości pręta warstwy górnej

¹ - Program „Bar” opracowano w ramach prac nad rozprawą doktorską jednego ze współautorów.

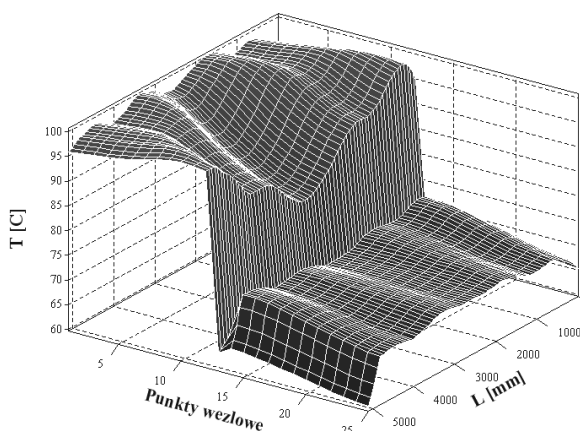
i dolnej. Jest on efektem nierównego rozkładu strat dodatkowych w danej warstwie oraz oddziaływaniem gazu, podgrzanego w uzwojeniu wirnika. Temperatura pręta dolnego jest niższa od pręta górnego o około 40 °C. Najniższa temperatura występuje w przekładce między prętami. Jest ona niższa od temperatury pręta warstwy dolnej o około 6 °C.

Rozkład temperatury



Rys.5. Rozkład temperatury w przecie warstwy górnej i dolnej żłobka numer 3

Rozkład temperatury



Rys.6. Rozkład temperatury w przecie warstwy górnej i dolnej żłobka numer 18

Przekładka wykonana jest z materiału, który stanowi dobrą izolację termiczną i nie występują w niej straty dodatkowe. Styka się z izolacją główną prętów, która posiada niski współczynnik przewodzenia ciepła λ . Dla tych warunków występuje duża oporność cieplna między przekładką a prętami powodując, że jej temperatura jest niska.

W praktyce pomiary temperatury uzwojenia stojana wykonuje się za pomocą czujników RTD usytuowanych w środku przekładki. Stąd

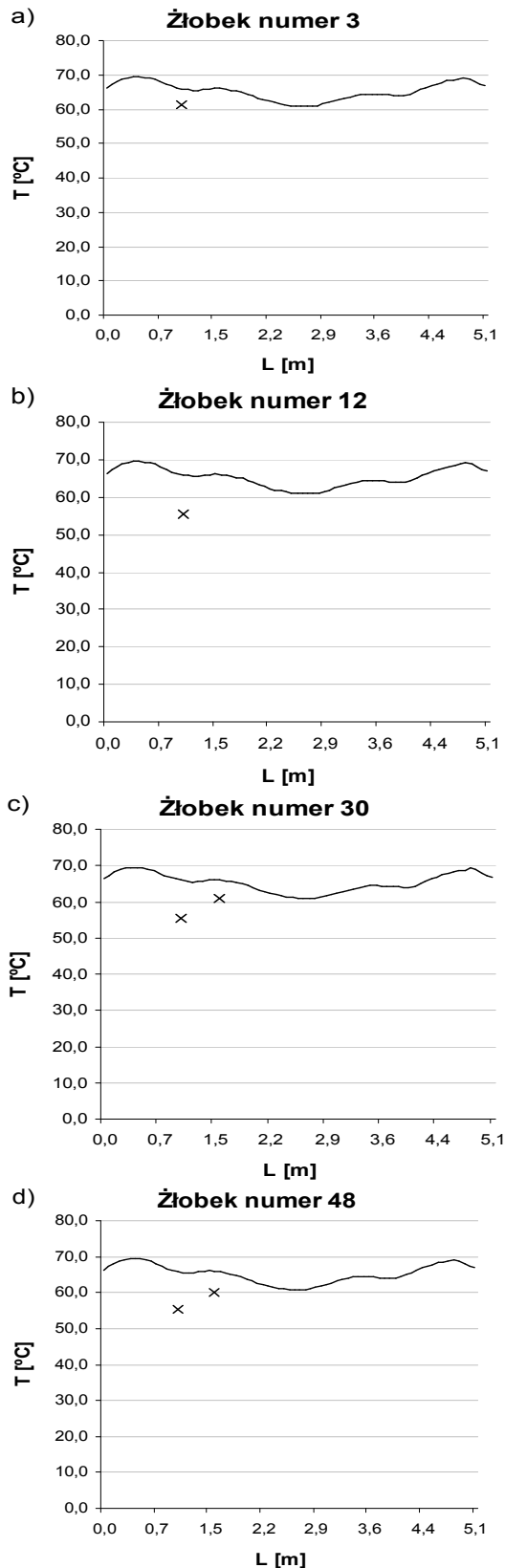
istotne znaczenie dla weryfikacji metody obliczeń mają obliczenia temperatury w tej przekładce. Wyniki tych obliczeń dla różnych żłobków porównano z wynikami pomiarów wykonanymi podczas prób ruchowych turbogenerators (rys. 7, 8). W tabeli 1 zestawiono wartości temperatur zmierzone za pomocą czujników usytuowanych w 8 żłobkach w różnych położeniach na długości strefy żłobkowej.

Tabela 1. Wyniki temperatury w przekładce między prętami warstwy górnej i dolnej

L.p.	numer żłobka	pozycja [m]	temperatura obliczona [°C]	temperatura zmierzona [°C]
1	3	0,977	65,9	61,2
2	12	0,977	65,9	55,5
3	18	2,050	61,5	58,4
4	18	2,570	60,0	62,1
5	27	0,427	65,8	62,0
6	27	2,050	61,5	58,4
7	30	0,977	65,9	55,3
8	30	1,547	66,0	60,8
9	36	2,570	60,0	62,2
10	36	2,050	62,1	61,8
11	45	0,427	65,8	57,6
12	45	2,050	61,5	61,1
13	48	1,547	66,0	60,2
14	48	0,977	65,9	55,5

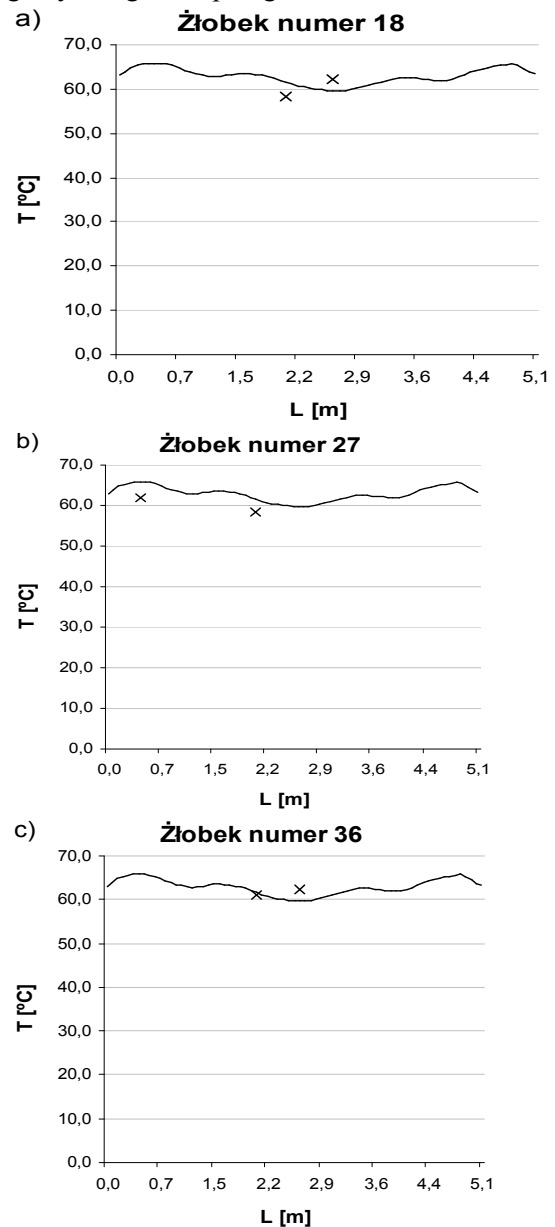
Pozycje każdego czujnika zdefiniowano jako odległość od krawędzi rdzenia do miejsca usytuowania czujnika w kierunku osi „z” maszyny. Dla tak zdefiniowanych położenia czujników obliczono wartości temperatur w poszczególnych żłobkach.

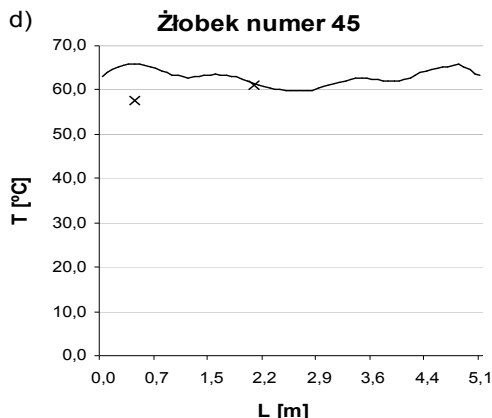
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono porównanie temperatur zmierzonych z obliczonymi. Wartości zmierzone oznaczono symbolem „x”. Obliczenia rozkładów temperatur wykonano dla żłobków zawierających pręty tej samej fazy (żłobki nr 3, 12, 30, 48) i żłobków z prętami różnych faz (żłobki nr 18, 27, 36, 45). W żłobkach z prętami tej samej fazy rozkłady temperatur mają identyczny przebieg. Wartość maksymalna wynosi około 69,5 °C natomiast minimalna 61,0 °C. W żłobkach z prętami różnych faz uzyskano również podobny przebieg przy maksymalnej wartości temperatury 66,0 °C i minimalnej 59,5 °C. Z porównania wykresów (rys. 7, 8) wynika, iż temperatura w przekładce zależy od tego czy w żłobku znajdują się pręty tej samej czy różnych faz.



Rys.7. Rozkład temperatury w przekładce między prętami warstwy górnej i dolnej należącymi do tej samej fazy: a) żłobek nr 3, b) żłobek nr 12, c) żłobek nr 30, d) żłobek nr 48

Z 14 przedstawionych punktów pomiarowych, w 2 pkt temperatura zmierzona jest większa od obliczonej (żłobki nr 18 i 36 - rys. 8). W żłobku numer 18 wartość zmierzona jest większa od obliczonej o około 2,1 °C, natomiast w żłobku nr 36 o około 2,2 °C. Dla pozostałych 12 punktów temperatura zmierzona jest mniejsza od obliczonej. Największa różnica zachodzi dla żłobka numer 30 i wynosi 10,6 °C, najmniejsza dla żłobka 36 i wynosi 0,3 °C. Na podstawie porównania temperatur obliczonych z pomierzonymi można stwierdzić, że model cieplny oparty na metodzie schematów cieplnych daje poprawne wyniki. Zaobserwowane różnice mogą wynikać z uproszczeń modelu elektromagnetycznego i cieplnego.





Rys.8. Rozkład temperatury w przekładce między prętami warstwy górnej i dolnej należącymi do różnych faz: a) żłobek nr 18, b) żłobek nr 27, c) żłobek nr 36, d) żłobek nr 45.

4. Wnioski

Opisana metoda schematów cieplnych uwzględnia przewodnictwo ciepła przez izolacje i rdzeń, przejmowanie ciepła od przewodów i blach do czynnika chłodzącego w kanałach wentylacyjnych. Przedstawiony model cieplny pozwala wyznaczyć rozkłady temperatur wzdłuż długości i wysokości pręta warstwy górnej i dolnej oraz w przekładce między prętami uzwojenia stojana. Wykonane porównanie temperatur obliczonych z pomiarami umożliwia weryfikację modelu cieplnego. Podział pręta uzwojenia stojana na tzw. sekcje i węzły cieplne umożliwia określenie wpływu przepłotu przewodów elementarnych na rozkład temperatury w pręcie uzwojenia stojana.

5. Literatura

- [1]. Gurazdowski D., Zawilak J., *Wpływ przepłotu przewodów elementarnych na rozkład gęstości prądu w pręcie turbogeneratorskiego*. Prace naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych PWr. nr 58, 2005, s. 222-234
- [2]. Hering M., *Termokinetyka dla elektryków*. WNT, Warszawa 1980
- [3]. Krok R., *Wyznaczanie ustalonych i niestabilnych przestrzennych rozkładów temperatur w wirnikach turbogeneratorów dużej mocy z uwzględnieniem czynnika chłodzącego przy różnych systemach chłodzenia uzwojenia wzbudzenia*. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1998
- [4]. Latek W., *Turbogeneratory*. WNT, Wa-wa 1973.
- [5]. Rut R., *Analiza niestabilnych stanów termicznych uzwojeń silników indukcyjnych dużej mocy w trudnych warunkach rozruchowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2001.

- [6]. Różycki A., *Laboratorium badań cieplno-wentylacyjnych maszyn elektrycznych i transformatorów*. Politechnika Śląska, skrypt uczelniany nr 1222, Gliwice 1986
- [7]. Pełczewski W., *Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych*. PWT, Warszawa 1956
- [8]. Traxler-Samek G., *Zusatzverluste im stirnraum von hydrogeneratoren mit Roebelstabwicklung*. Technischen Universität Wien, Mai 2003, Rozprawa doktorska.
- [9]. Szargut J., *Modelowanie numeryczne pól temperatury*. WNT, Warszawa 1992

Autorzy

Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław

e-mail: dariusz.gurazdowski@pwr.wroc.pl
jan.zawilak@pwr.wroc.pl

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w ramach projektu badawczego nr 3 T10A 005 26