

Roman KROK, Roman MIKSIEWICZ
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

OBWODOWY MODEL CIEPLNY DO OBLICZEŃ POLA TEMPERATUR W UWZOJENIU WZBUDZENIA TURBOGENERATORA Z CHŁODZENIEM BEZPOŚREDNIM ZABIERAKOWYM

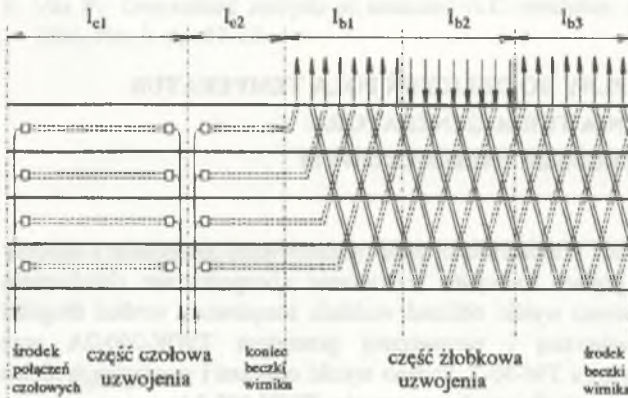
Streszczenie. W pracy przedstawiono model matematyczny pozwalający obliczyć rozkład temperatury w prętach uzwojenia wzbudzenia z bezpośrednim chłodzeniem zabierakowym. Przedstawiono wyniki obliczeń rozkładu temperatury wzdłuż długości prętów dla cewki zewnętrznej i wewnętrznej generatora TWW-200-2A oraz zmodernizowanego generatora TW-50-2. Podano wyniki obliczeń i pomiarów średnich temperatur uzwojeń wzbudzenia dla trzech generatorów TWW-200-2A.

THERMAL/ELECTRICAL DIAGRAM FOR CALCULATION OF THE TEMPERATURE FIELD IN EXCITATION WINDING OF A TURBOGENERATOR WITH A DIRECT COOLING SYSTEM

Summary. The paper presents a mathematical model describing temperature distribution in the bars of excitation winding with direct cooling system. Calculation results of temperature distribution along the bar length for the inner and outer coils of TWW-200-2A and moderised TW-50-2 generators are given. Calculation and measurement results of excitation windings mean temperatures for three TWW-200-2A generators are presented as well.

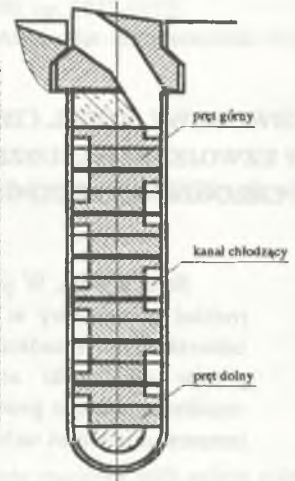
1. WSTĘP

Zabierakowy system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia stosowany jest w generatorach produkcji krajowej o mocy 200 MW. Sposób rozmieszczenia kanałów wentylacyjnych w żłobkach wirnika oraz kierunek przepływu wodoru w kanałach jest przedstawiony na rys. 1 i 2.



Rys.1. Zabierakowy system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia turbogenerators TWW-200-2A

Fig.1. Direct radial-axial cooling system of excitation winding of TWW-200-2A turbogenerator



Rys.2. Przekrój żłobka wirnika

Fig.2. Cross-section of a rotor slot

System zabierakowy (szczegółowo opisany w [1]) działa na zasadzie samoczynnej wentylacji i pozwala na wielostrugowe chłodzenie uzwojenia wzbudzenia przez dwa niezależne systemy wentylacji:

- aksjalnej w częściach czołowych uzwojenia,
- aksjalno-radialnej w części żłbkowej uzwojenia.

W artykule [1] przedstawiono model matematyczny opisujący jednowymiarowy rozkład temperatury w górnym (leżącym pod zabierakiem) pręcie uzwojenia wzbudzenia, przy założeniu między innymi braku przepływu ciepła do pręta sąsiedniego oraz do beczki wirnika. W poszczególnych obszarach związanych z systemem wentylacji pręt ten podzielono (wzdłuż długości) na odcinki elementarne. Równaniom bilansu mocy dla poszczególnych elementarnych odcinków pręta przyporządkowano zastępcze schematy cieplne. W wyniku łańcuchowego połączenia schematów elementarnych, odpowiadającego połączeniu szeregowemu

poszczególnych elementarnych odcinków pręta, uzyskano zastępczy schemat cieplny dla pręta górnego, stanowiący podstawę dla wyznaczania rozkładu temperatury w analizowanym pręcie.

Z analizy drogi przepływu medium chłodzącego wynika, że największe przyrosty temperatur oraz największa nierównomierność rozkładu temperatury występują w przecie górnym każdej z cewek i dla niego też zwykle wykonuje się obliczenia. Stosowanie jednak bardzo uproszczonego modelu cieplnego, w którym górny pręt uzwojenia traktuje się jako element autonomiczny (pomija się przepływ ciepła z tego pręta do prętów sąsiednich oraz do beczki wirnika), powoduje, że obliczenia wykonane z jego pomocą obarczone są znacznym błędem i mogą być traktowane jedynie jako obliczenia szacunkowe. Całościowa analiza rozkładu temperatury, we wszystkich prętach uzwojenia wzbudzenia, wymaga uwzględnienia przepływu ciepła pomiędzy sąsiednimi prętami cewki uzwojenia oraz pomiędzy prętami a beczką wirnika. Istnieje więc potrzeba opracowania modelu cieplnego opisującego rozkład temperatury w uzwojeniu z uwzględnieniem przepływu ciepła w żłobku wirnika w kierunku aksjalnym oraz radialnym.

2. MODEL CIEPLNY DO OBLICZEŃ ROZKŁADU TEMPERATURY W CEWKACH UZWOJENIA WZBUDZENIA

Prezentowany w niniejszej pracy model cieplny stosowany do obliczeń pola temperatur w cewkach uzwojenia wzbudzenia, stanowi rozszerzenie modelu prezentowanego w pracy [1]. W stosunku do modelu uproszczonego uwzględniono:

- przepływ ciepła pomiędzy prętami uzwojenia,
- przepływ ciepła w części żłobkowej z prętów uzwojenia do beczki wirnika.

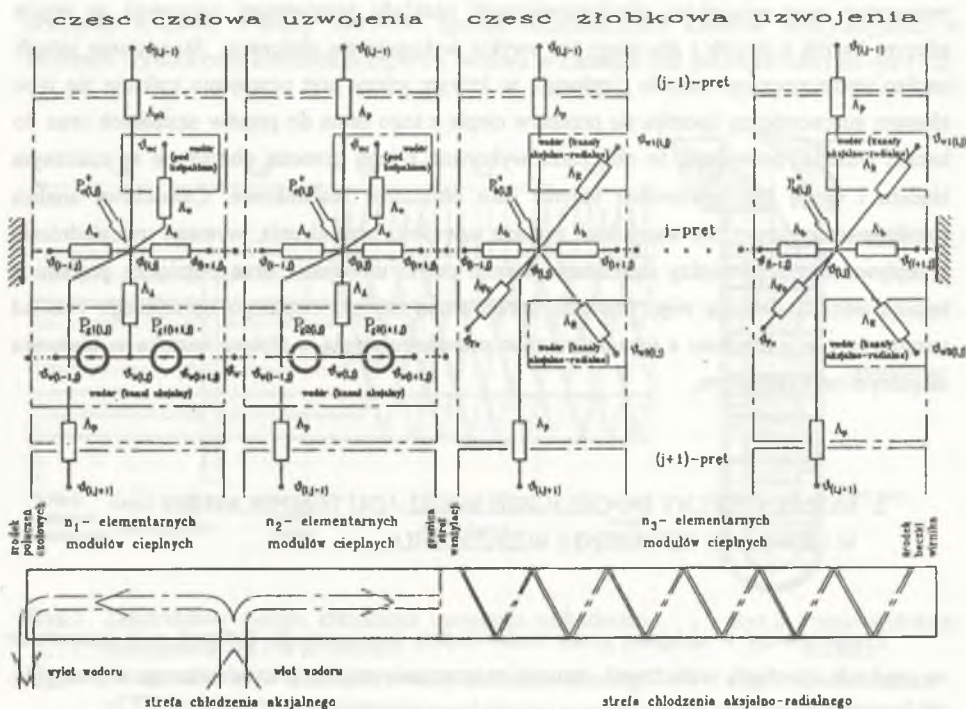
Nadal utrzymane są w mocy pozostałe założenia upraszczające, a mianowicie:

- medium wpływające do kanałów ze szczeliny ma we wszystkich strefach wlotu jednakową temperaturę,
- przewodność cieplna właściwa materiału uzwojenia, izolacji oraz współczynnik wnikania ciepła do medium chłodzącego nie zależą od temperatury.

Przyjęto ponadto stałość gęstości liniowej strumienia cieplnego konwekcji w kanałach aksjalno-radialnych.

Zastępczy schemat cieplny uzwojenia wzbudzenia (rys.3) otrzymano w wyniku łańcuchowego połączenia schematów cieplnych zbudowanych dla poszczególnych prętów [1] za pośrednictwem przewodności cieplnych Λ_p (elementarnych odcinków przekładki izolacyjnej pomiędzy prętami) oraz poprzez dołączenie przewodności cieplnych Λ_{Fe}

(reprezentujących przewodności cieplne elementarnych odcinków izolacji żłobkowej, związanych z przepływem ciepła z prętów uzwojenia do beczki wirnika).



Rys.3. Zastępczy ciepło-elektryczny schemat dla zabierakowego systemu wentylacji

Fig.3. Equivalent thermal/electrical diagram for direct system of ventilation

Schemat ten stanowi podstawę do obliczeń dwuwymiarowego rozkładu temperatury w cewkach uzwojenia. Można w nim wyróżnić 3 strefy wzdłuż długości każdego z prętów, związane ściśle ze sposobem chłodzenia:

- dwie strefy w obszarze chłodzenia aksjalnego różniące się kierunkiem przepływu medium chłodzącego w kanałach wykonanych w prętach (czoła uzwojeń),
- jedna strefa w obszarze chłodzenia aksjalno-radialnego (część żłobkowa uzwojeń).

Każdą ze stref podzielono odpowiednio na równe odcinki elementarne, którym odpowiada podział na n_1 , n_2 , n_3 części i przyporządkowano im elementarne moduły cieplne. Schemat cieplny każdej z wymienionych stref składa się więc z połączonych łańcuchowo

elementarnych modułów cieplnych, których liczba w każdej strefie odpowiada liczbie podziału. Natomiast wzdłuż wysokości żłobka podział jest związany z liczbą prętów w żłobku - l_p . Tak więc kompletny schemat zastępczy stanowi połączenie $(n_1 + n_2 + n_3) \times l_p$ elementarnych modułów cieplnych.

Na szczególną uwagę zasługują fragmenty schematu modelujące rozkład temperatur w medium chłodzącym - w kanałach aksjalnych wykonanych w czołach uzwojenia. Występujące tu źródła mocy cieplnej, których wydatki zależą od temperatur w sąsiednich węzłach, wyznaczają moc równą mocy cieplnej unoszonej w danej odległości od wlotu medium chłodzącego do kanału, przez przepływający w kanale czynnik chłodzący.

Opracowanie schematów cieplnych dla przepływającego w kanałach czynnika chłodzącego umożliwiło utworzenie jednolitego schematu modelującego rozkład temperatury w prętach uzwojenia oraz w wodorze.

Występujące na schemacie elementy oznaczają:

- **temperatury:**

- $\vartheta_{(i,j)}$ - węzła reprezentującego i-ty odcinek elementarny pręta j-tego,
- $\vartheta_{w(i,j)}$ - wodoru w węźle i-tym umieszczonym w kanale aksjalnym w przecie j-tym,
- $\vartheta_{w1(i,j)}, \vartheta_{w2(i,j)}$ - wodoru w kanałach aksjalno-radialnych umieszczonych na i-tym odcinku w i-tym przecie odpowiednio na jednym i na drugim boku żłobka,
- ϑ_{wc} - wodoru pod kołpakiem,
- ϑ_{Fe} - żelaza beczki wirnika,

- **straty ciepłe wydzielane w elementarnych odcinkach pręta:**

$P_{e(i,j)}^*$ - wydzielane w i-tym elementarnym odcinku j-tego pręta znajdującym się w obrębie części czołowej uzwojenia,

$P_{b(i,j)}^*$ - wydzielane w i-tym elementarnym odcinku j-tego pręta znajdującym się w obrębie części żłobkowej uzwojenia,

$$P_{e(i,j)}^* = P_e (1 + \beta \vartheta_{(i,j)}), \quad P_{b(i,j)}^* = P_b (1 + \beta \vartheta_{(i,j)}),$$

$$P_e = p_e S_e \Delta x, \quad P_b = p_b S_b \Delta x,$$

gdzie:

- p_e, p_b - jednostkowe straty mocy w części żłobkowej i czołowej pręta w temperaturze odniesienia (temperaturze wodoru po wyjściu z chłodnicy),
- S_e, S_b - pole przekroju poprzecznego pręta w części czołowej i żłobkowej,
- Δx - długość elementarnego odcinka pręta,
- β - termiczny współczynnik rezystancji materiału pręta,

– **moc cieplna unoszona przez przepływający w kanale aksjalnym wodór:**

$P_{gk(i,j)}$ - moc cieplna unoszona przez wodór przepływający przez i-ty odcinek elementarny kanału aksjalnego wewnątrz j-tego pręta w k-tej strefie wentylacji ($k=1,2$)

$$P_{gk(i,j)} = L_{gk} (\mathcal{Q}_{w(i-1,j)} + \mathcal{Q}_{w(i,j)})$$

gdzie:

L_{gk} - współczynnik określający wydatek źródeł mocy cieplnych w k-tej strefie chłodzenia aksjalnego,

– **przewodności cieplne związane ze zjawiskiem przewodzenia ciepła:**

Λ_c, Λ_b - dla ruchu ciepła wzdłuż prętów odpowiednio w części czołowej i żłobkowej,

Λ_p - dla ruchu ciepła poprzez przekładki izolacyjne umieszczone pomiędzy prętami,

Λ_{Fe} - dla ruchu ciepła z prętów poprzez izolację żłobkową do żelaza beczki wirnika,

$$\Lambda_c = \frac{\lambda S_c}{\Delta x}, \quad \Lambda_b = \frac{\lambda S_b}{\Delta x}, \quad \Lambda_p = \frac{\lambda_p b \Delta x}{g_p}, \quad \Lambda_{Fe} = \frac{2 \lambda_z h \Delta x}{g_z},$$

gdzie:

λ - przewodność cieplna właściwa materiału pręta,

λ_p - przewodność cieplna właściwa przekładki izolacyjnej,

λ_z - przewodność cieplna właściwa izolacji żłobkowej,

b - szerokość pręta,

h - wysokość pręta,

g_p - grubość przekładki izolacyjnej,

g_z - jednostronna grubość izolacji żłobkowej,

– **przewodności cieplne związane ze zjawiskiem konwekcji:**

Λ_A - dla ruchu ciepła z powierzchni kanału aksjalnego do omywającego ją wodoru,

Λ_R - dla ruchu ciepła z powierzchni kanału aksjalno-radialnego do omywającego ją wodoru,

Λ_w - dla ruchu ciepła z powierzchni prętów w części czołowej do wodoru pod kołpakiem,

$$\Lambda_A = \alpha_A u_A \Delta x, \quad \Lambda_R = \alpha_R u_R \Delta x, \quad \Lambda_w = 2 \alpha_w h \Delta x,$$

gdzie:

α_A, α_R - współczynniki oddawania ciepła z powierzchni kanałów aksjalnych i radialnych do chłodzącego je wodoru,

- α_w - współczynnik oddawania ciepła z powierzchni izolowanych prętów do wodoru pod kołpakiem,
- u_A - obwód kanału aksjalnego w części czołowej,
- u_B - zastępczy obwód styku wodoru i miedzi pręta w radialnym kanale chłodzącym [2],

– **współczynniki określające wydatki źródeł mocy cieplnych:**

współczynnik L_{gk} - w k-tej strefie chłodzenia aksjalnego:

$$L_{gk} = \frac{cQ_k}{2}, \quad k=1, 2$$

gdzie:

- c - ciepło właściwe medium chłodzącego,
- Q_k - wydatek medium chłodzącego w pojedynczym kanale aksjalnym w k-tej strefie ($k=1, 2$).

3. ALGORYTM OBLICZEŃ I PROGRAM KOMPUTEROWY

Rozkład dwuwymiarowego pola temperatury w uzwojeniu wzbudzenia uzyskuje się rozwiązując układ równań algebraicznych opisujących schemat cieplny przedstawiony na rys.3. Opracowany na podstawie tego schematu algorytm:

- * buduje i rozwiązuje układ równań odpowiadający schematowi cieplnemu (rys.3) o liczbie węzłów wynikającej z liczby podziału prętów oraz liczby prętów w żłobku.

Elementem zasadniczym zastosowanego algorytmu jest zaproponowany sposób obliczeń umożliwiający ograniczenie liczby rozwiązywanych równań w każdej iteracji. Dzięki temu program wymaga mniejszej pamięci operacyjnej oraz uzyskuje się przyspieszenie czasu obliczeń, umożliwiając ich wykonywanie na komputerach klasy PC (schematy o liczbie węzłów kilka tysięcy rozwiązywane są w ciągu kilkunastu minut).

W celu uzyskania wstępnych (startowych) wartości temperatur w węzłach schematu cieplnego pomija się w fazie obliczeń wstępnych przepływ ciepła pomiędzy prętami uzwojenia oraz z prętów do żelaza beczki wirnika. Umożliwia to rozwiązanie schematu cieplnego dla każdego pręta uzwojenia oddzielnie. Układ równań wynikający z zastosowania metody potencjałów węzłowych (tutaj temperatur węzłowych) do schematu cieplnego j-tego pręta ma postać:

$$[A]_{(j)} [T_p]_{(j)} = [B]_{(j)} \quad (1)$$

gdzie:

$[A]_{(j)}$ - macierz przewodności cieplnych,

$[B]_{(j)}$ - wektor wymuszeń cieplnych,

$$[\mathcal{S}_p]_{(j)} = \left[[\mathcal{S}]_{(j)} \quad [\mathcal{S}_w]_{(j)} \right]^T$$

$[\mathcal{S}]_{(j)}$ - wektor temperatur węzłów reprezentujących elementarne odcinki j-tego pręta,

$[\mathcal{S}_w]_{(j)}$ - wektor temperatur węzłów reprezentujących wodór przepływający w kanałach aksjalnych w j-tym przecie.

Struktura macierzy występujących w układzie równań (1) została szczegółowo przedstawiona w pracy [1].

Jeżeli uwzględnić wymianę ciepła pomiędzy prętami oraz do żelaza beczki wirnika, wówczas układ równań opisujący rozkład temperatury w pojedynczym przecie można przedstawić w postaci:

$$[A]_{(j)} [\mathcal{S}_p]_{(j)} = [B]_{(j)} - [P]_{(j)}, \quad (2)$$

gdzie:

$[P]_{(j)}$ - wektor mocy cieplnych przekazywanych z rozpatrywanego j-tego pręta do prętów sąsiednich oraz do żelaza:

$$[P]_{(j)} = \left[P_{1(j)} \quad P_{2(j)} \quad \dots \quad P_{i(j)} \quad \dots \quad P_{n(j)} \quad ; \quad 0 \quad \dots \quad 0 \right]^T \quad (3)$$

$P_{1(j)} + P_{n(j)}$ - moce cieplne wprowadzane do węzłów schematu reprezentujących elementarne odcinki pręta j-tego,

n - liczba węzłów schematu reprezentujących elementarne odcinki j-tego pręta ($n = n_1 + n_2 + n_3$).

$$P_{i(j)} = -\Lambda'_{Fe} (\mathcal{S}_{(i,j)} - \mathcal{S}_{(i,j-1)}) - \Lambda''_{Fe} (\mathcal{S}_{(i,j)} - \mathcal{S}_{(i,j+1)}) - \Lambda'_{Fe} (\mathcal{S}_{(i,j)} - \mathcal{S}_{Fe}) \quad (4)$$

gdzie:

$\Lambda'_{Fe} = 0$ - dla i odpowiadającego numerowi węzła reprezentującego elementarny odcinek pręta znajdujący się w obszarze połączeń czołowych,

$\Lambda'_{Fe} = \Lambda_{Fe}$ - dla i odpowiadającego numerowi węzła reprezentującego elementarny odcinek pręta znajdujący się w strefie żłobkowej.

dla $j=1 \quad \Rightarrow \Lambda'_p = \Lambda_p; \quad \Lambda''_p = 0$ - pręt górny pod klinem,

dla $j=2, \dots, 1_p - 1 \quad \Rightarrow \Lambda'_p = \Lambda''_p = \Lambda_p$ - pręty środkowe,

dla $j=1_p \quad \Rightarrow \Lambda'_p = 0; \quad \Lambda''_p = \Lambda_p$ - pręt dolny na dnie żłobka.

Dodatkowym problemem jest wyznaczenie rozkładów temperatur w kanałach aksjalno-radialnych, czyli temperatur $\mathcal{S}_{w1(i,j)}$ oraz $\mathcal{S}_{w2(i,j)}$ występujących na schemacie zastępczym.

Konsekwencją założenia stałej gęstości liniowej strumienia ciepłego konwekcji w kanałach aksjalno-radialnych jest liniowy rozkład temperatury wodoru w kanałach, poczynając od zadanej temperatury na wlocie do tych kanałów, a kończąc na znanej temperaturze na wylocie. Szczegółowa analiza przepływu poszczególnych równoległych strug wodoru w kanałach aksjalno-radialnych, z uwzględnieniem podanych wcześniej założeń upraszczających, pozwala na wyznaczenie temperatur $\vartheta_{w1(i,j)}$ oraz $\vartheta_{w2(i,j)}$ w schematach cieplnych poszczególnych prętów.

W zaproponowanym iteracyjnym algorytmie rozwiązywania schematu cieplnego można wyróżnić następujące etapy:

1) Określenie wstępnych wartości temperatur w węzłach schematu.

W etapie tym budowane są kolejno oraz rozwiązywane układy równań (1) dla $j=1,2,\dots,l_p$.

W wyniku ich rozwiązania wyznacza się wstępne wartości temperatur we wszystkich węzłach schematu przy założeniu braku wymiany ciepła pomiędzy prętami oraz z prętów do beczki wirnika.

2) Obliczenie wektorów mocy cieplnych przekazywanych z poszczególnych prętów do prętów sąsiednich oraz do żelaza.

W oparciu o relację (4) buduje się kolejne wektory mocy cieplnych (3) dla $j=1,2,\dots,l_p$.

Obliczenia wykonuje się korzystając z wartości temperatur wyznaczonych w poprzednim kroku iteracyjnym (lub wyznaczonych w punkcie 1 wstępnych wartości temperatur w przypadku pierwszej iteracji).

3) Obliczenie kolejnych przybliżeń wartości temperatur w węzłach schematu cieplnego.

Kolejne przybliżenia wartości temperatur węzłowych wyznacza się budując i rozwiązując kolejno układy równań (2) dla $j=1,2,\dots,l_p$, korzystając przy tym z wektorów mocy cieplnych $[P]_{(i)}$ wyznaczanych w etapie 2.

Warunkiem zakończenia iteracji jest uzyskanie założonej dokładności obliczeń temperatur węzłowych na danym etapie iteracyjnym.

Dzięki proponowanej metodzie obliczeniowej w poszczególnych etapach budowane są i rozwiązywane oddzielnie schematy cieplne opisujące rozkłady temperatury w pojedynczych prętach, co pozwala na znaczne ograniczenie wymaganej pamięci operacyjnej. Niemniej jednak metoda ta wymaga wielokrotnego powtarzania obliczeń.

Korzystając jednak z faktu, że o rozkładzie temperatur w prętach uzwojenia decyduje w głównej mierze moc cieplna przekazywana z prętów do wodoru w kanałach aksjalnych oraz aksjalno-radialnych (jest ona znacznie większa od mocy cieplnej przekazywanej pomiędzy prętami oraz z prętów do żelaza), uzyskane w etapie 1 wstępne przybliżenie temperatur węzłowych jest stosunkowo bliskie wartościom końcowym i dzięki temu ilość wymaganych iteracji jest stosunkowo niewielka.

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Wykorzystując opracowany program komputerowy wykonano obliczenia rozkładu temperatury w uzwojeniu wzbudzenia turbogenerators TW-200-2A w znamionowym warunkach pracy:

$$S_N = 235 \text{ MV} \cdot \text{A}, \quad U_N = 15.75 \text{ kV}, \quad \cos \varphi_N = 0.8 \text{ i}, \quad I_N = 8625 \text{ A}, \quad I_{WN} = 2660 \text{ A}.$$

Prędkości wodoru w poszczególnych kanałach przyjęto z obliczeń układu wentylacyjnego przeprowadzonych w pracy [3].

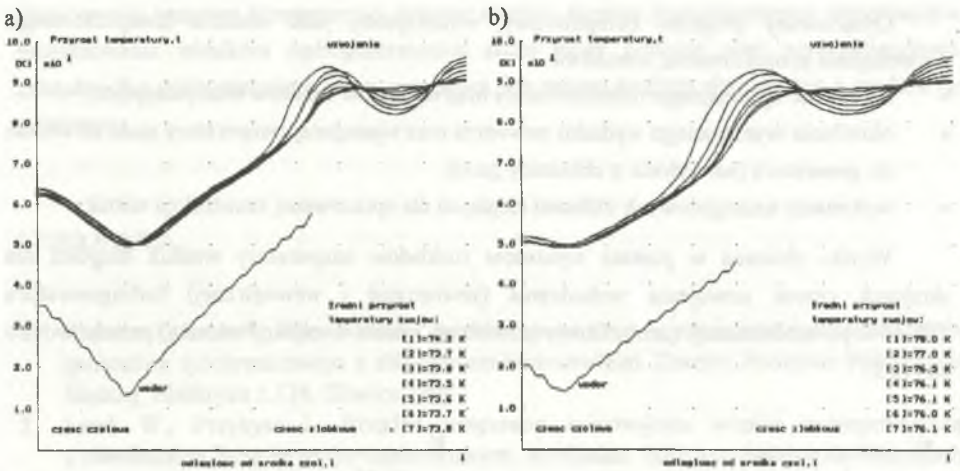
Uzwojenie wzbudzenia składa się w tym przypadku z 7 prętów umieszczonych w żłobku (licząc od klina żłobkowego do dna żłobka). Poszczególne pręty podzielono na równe odcinki elementarne, którym przyporządkowano elementarne moduły cieplne. Zbudowany z nich schemat cieplny dla przyjętych danych ma następującą liczbę węzłów:

- w prętach uzwojenia - 420,
- w wodorze w kanałach aksjalnych - 250,
- w wodorze w kanałach aksjalno-radialnych - 340,
- całkowita liczba węzłów - 1010.

Wyniki obliczeń w postaci wykresów rozkładów temperatury wzdłuż długości dla skrajnych cewek (zewewnętrznej i wewnętrznej) przedstawiono na rys.4.

Z wykresów wynikają następujące wnioski:

- największe nierównomierności rozkładu temperatury w części żłobkowej oraz największe przyrosty temperatur lokalnych występują w przecie górnym (pierwszym pod klinem) dla każdej z cewek (na wykresach odpowiadają im przebiegi temperatury o największej amplitudzie zmian w części żłobkowej). Maksymalny przyrost temperatury w części żłobkowej wynosi 107.5% wartości średniego przyrostu temperatury w tej części,
- największy lokalny przyrost temperatury występuje w przecie górnym cewki wewnętrznej (cewki o najkrótszych połączeniach czołowych) i wynosi 97 K, co stanowi 129% średniego przyrostu temperatury uzwojenia wzbudzenia. W pozostałych cewkach maksymalne przyrosty temperatur różnią się niewiele (maksymalnie o 1.5 K) od wartości maksymalnej cewki wewnętrznej,
- pomimo znacznych różnic w rozkładach temperatur wzdłuż długości poszczególnych zezwojów w obrębie cewki, jak i w poszczególnych cewkach, średnie przyrosty temperatur poszczególnych zezwojów oraz cewek są zbliżone. Maksymalna różnica średnich przyrostów temperatury poszczególnych zezwojów w cewce wynosi 4.2 K, zaś poszczególnych cewek 3.0 K.



Rys. 4. Rozkład przyrostów temperatur wzdłuż długości pręta uzwojenia wzbudzenia dla generatora TWW-200-2A: a) cewka zewnętrzna, b) cewka wewnętrzna

Fig. 4. Distributions of temperature rise along bars of excitation winding for turbogenerator with the power 200 MW: a) outer coil, b) inner coil

Weryfikacja wyników obliczeń opiera się na porównaniu średnich przyrostów temperatur dla całego uzwojenia (obliczonych oraz zmierzonych metodą oporową). W tabelicy 1 zestawiono wartości średnich przyrostów temperatury uzwojeń wzbudzenia dla trzech generatorów TWW-200-2A (pracujących w elektrowni Rybnik), przy trzech wartościach prądów wzbudzenia (przy zachowaniu znamionowych warunków wentylacji), zmierzonych metodą oporową oraz wyniki obliczeń wg prezentowanej metody. Wyniki weryfikacji pomiarowej modelu cieplnego można uznać za zadowalające.

Tabela 1

Prąd wzbudz. [A]	Przyrost średniej temperatury [K]			
	Pomiary			Oblicz.
	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	
2460	74.5	71.6	77.0	72.2
2220	60.7	62.0	63.0	61.0
1670	39.3	33.1	38.1	40.7

zestawiono wartości średnich przyrostów temperatury uzwojeń wzbudzenia dla trzech generatorów TWW-200-2A (pracujących w elektrowni Rybnik), przy trzech wartościach prądów wzbudzenia (przy zachowaniu znamionowych warunków wentylacji), zmierzonych metodą

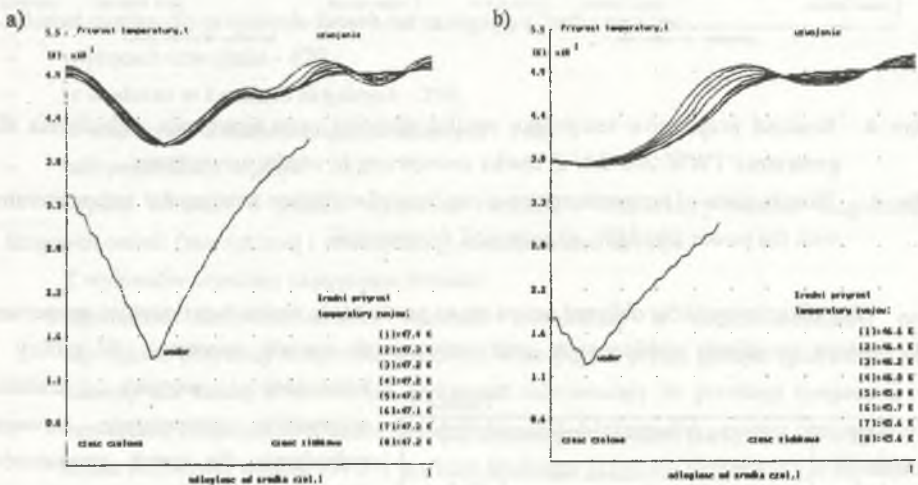
oporową oraz wyniki obliczeń wg prezentowanej metody. Wyniki weryfikacji pomiarowej modelu cieplnego można uznać za zadowalające.

Prezentowany program komputerowy wykorzystany został również w procesie projektowania układu wentylacyjnego oraz uzwojenia wzbudzenia wirnika turbogeneratora TW-50-2 podczas jego modernizacji. Celem prowadzonej modernizacji turbogeneratora jest zmiana medium chłodzącego z wodoru na powietrze. Zmiana ta pociągnęła za sobą konieczność przejścia z systemu wentylacji pośredniego na bezpośredni zabierakowy.

Opracowany program komputerowy, wykorzystany jako element komputerowego wspomagania projektowania, umożliwił:

- określenie optymalnego rozmieszczenia oraz wymiarów kanałów wentylacyjnych,
- określenie wymaganego wydatku powietrza oraz wymaganej temperatury gazu na wlocie do generatora (na wylocie z chłodnicy gazu),
- wykonanie szczegółowych obliczeń cieplnych dla opracowanej konstrukcji wirnika.

Wyniki obliczeń w postaci wykresów rozkładów temperatury wzdłuż długości dla skrajnych cewek uzwojenia wzbudzenia (zewnętrznej i wewnętrznej) turbogeneratora TW-50-2 po modernizacji (zabierakowy powietrzny system wentylacji wirnika) przedstawiono na rys.5.



Rys. 5. Rozkład przyrostów temperatur wzdłuż długości pręta uzwojenia wzbudzenia dla generatora TW-50-2 po modernizacji (zabierakowy, powietrzny system wentylacji wirnika): a) cewka zewnętrzna, b) cewka wewnętrzna

Fig. 5. Distributions of temperature rise along bars of excitation winding for TW-50-2 modernised generator (direct, air ventilation system of rotor): a) outer coil, b) inner coil

Przedstawiona weryfikacja pomiarowa wyników symulacji komputerowych wykonanych dla wirnika turbogeneratora TWW-200-2A potwierdza możliwość stosowania prezentowanego modelu do badań symulacyjnych oraz analiz projektowych.

Opracowany program komputerowy stanowi obecnie element komputerowego wspomagania projektowania wirników turbogeneratorów dużej mocy podczas prac modernizacyjnych związanych z podwyższeniem mocy generatora, lub zmianą medium chłodzącego z wodoru na powietrze.

LITERATURA

1. Kapinos J., Krok R., Miksiewicz R.: Rozkład temperatury w pręcie uzwojenia wzbudzenia generatora synchronicznego z chłodzeniem bezpośrednim. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z.138, Gliwice 1994.
2. Latek W., Przybysz J.: Rozkład temperatur w uzwojeniu wirnika turbogeneratora z chłodzeniem bezpośrednim zabierakowym. Archiwum Elektrotechniki, z.3, Warszawa 1969.
3. Filippow I. F.: Osnovy tieploobmienu w elektriczeskich maszinach. Energija 1974.
4. Paszek W., Drak B., Kapinos J., Miksiewicz R., Krok R., Pilch Z.: Modernizacja turbogeneratora TWW-200-2A w celu podwyższenia mocy do 220 MW przy współczynniku mocy $\cos\varphi = 0.85$ i zachowaniu istniejącego sposobu chłodzenia turbogeneratora. Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej. Opracowanie Nr 6/59/RE-4/94.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy HICKIEWICZ, prof. WSI w Opolu

Wpłynęło do Redakcji dnia 16 listopada 1995 r.

Abstract

The paper presents a mathematical model describing temperature distribution in the bars of excitation winding with direct cooling system. A thermal model of this winding is shown in Fig.3. Among other things it takes into account axial heat flow in the bars and radial heat flow between the winding bars. A calculation algorithm allowing to limit the number of equations solved at each iterative stage (which enables calculations for a number of nodes) is suggested for the system of algebraic equations.

Calculation results of temperature distribution along the bar length for the inner and outer coils of TWW-200-2A and TW-50-2 modernised generator with direct air ventilation system of rotor are shown in Fig.4 and Fig.5 respectively. Calculation and measurement results of excitation windings mean temperatures for three TWW-200-2A generators and three values of exciting current are presented in Tab.1. The obtained results of calculations indicate good concurrence with results of the measurements.

The presented method and computer program enable easy and quick computation of successive variants analysed on the stage of design and make very useful elements of the procedure of computer-aided design of rotors with direct system of ventilation whenever cooling medium composed of hydrogen or air is used.



Fig. 4. Temperature distribution along the bar length for the inner and outer coils of TWW-200-2A and TW-50-2 modernised generator with direct air ventilation system of rotor.