

Roman KROK, Roman MIKSIEWICZ
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

ZASTOSOWANIE MODELI OBWODOWYCH DO OBLICZEŃ PÓL TEMPERATURY W WIRNIKACH TURBOGENERATORÓW Z BEZPOŚREDNIM ORAZ POŚREDNIM SYSTEMEM WENTYLACJI UZWOJEŃ

Streszczenie. W artykule przedstawiono oryginalną metodę modelowania pól temperatury w wirnikach turbogeneratorów dużej mocy bazującą na metodzie sieci rezystancyjnych. W oparciu o opracowane modele cieplne dla różnych systemów wentylacji wykonano pakiet programów do obliczeń pól temperatury w wirnikach turbogeneratorów w przypadku medium chłodzącego wodoru lub powietrza. W artykule zaprezentowano wyniki obliczeń i pomiarów dla różnych systemów wentylacji.

APPLICATION OF THERMAL/ELECTRICAL RESISTANCE NETWORK FOR CREATING THERMAL MODELS OF TURBOGENERATOR ROTORS WITH DIRECT AND INDIRECT COOLING SYSTEM

Summary. The paper presents an original methods for modelling of thermal fields in rotors of high-power turbogenerators consisting in the development of the method of resistance networks. A package of computer programs for calculation of thermal fields in turbogenerator rotors when using hydrogen or air as a cooling medium has been developed basing on the thermal models worked out for various ventilation systems. The paper presents results of calculations and measurements for various ventilation systems.

1. WSTĘP

W fazie projektowania wirnika turbogeneratorsa istnieje potrzeba wyboru właściwego układu wentylacyjnego, jak i podstawowych parametrów tego układu, takich jak: ilość kanałów wentylacyjnych, wymiarów gabarytowych kanałów, sposobu ich rozmieszczenia itd. Wymaga to opracowania szeregu alternatywnych wariantów, a następnie w oparciu

o przeprowadzone obliczenia cieplne wyboru wariantu optymalnego. W ostatnich latach prowadzone są również prace modernizacyjne mające na celu zmianę medium chłodzącego w eksploatowanych generatorach z wodorowego na powietrzne. Generatory o chłodzeniu powietrznym są wygodniejsze, tańsze w eksploatacji i bezpieczniejsze. Równoległe ze zmianą medium chłodzącego dokonuje się z reguły zmiany systemu wentylacji z pośredniej na bezpośrednią w celu utrzymania mocy znamionowej generatora na poziomie takim, jak przy chłodzeniu wodorowym. Wymaga to analizy różnych wariantów systemów wentylacji i wyboru rozwiązania optymalnego. Istnieje więc, również w tym przypadku, potrzeba opracowania modeli cieplnych dla różnych konfiguracji kanałów wentylacyjnych w uzwojeniach oraz zębach wirnika.

Powszechnie stosowanym do tej pory sposobem analizy pól temperatury w wirnikach turbogeneratorów była metoda bazująca na analitycznych rozwiązaniach równania przewodnictwa ciepła [1,2,3]. Zastosowanie metod analitycznych wymaga jednak ograniczenia modelu do postaci kilku jednowymiarowych równań przewodnictwa ciepła opisujących rozkład temperatury w prętach uzwojenia oraz zębach wirnika. Konieczność takiego ograniczenia modelu wymaga przyjęcia szeregu założeń upraszczających mających wpływ na dokładność obliczeń.

Obecnie na rynku dostępnych jest szereg programów przeznaczonych do obliczeń pól temperatury, bazujących na metodzie elementów skończonych - MES. Specyfika budowy wirników turbogeneratorów uniemożliwia jednak bezpośrednie zastosowanie tych programów. W wirnikach turbogeneratorów, o systemie wentylacji bezpośredniej lub pośredniej uintensywnionej, przepływ ciepła odbywa się zarówno w kierunku osi obrotu wału, jak i w płaszczyźnie prostopadłej do tej osi. Modelowanie pola temperatury w tym przypadku może być wykonane tylko w oparciu o model trójwymiarowy. W procesie tworzenia siatki cienkie i bardzo długie przekładki izolacyjne oraz, stanowiące izolację żłobkową, korytka izolacyjne są dzielone na elementy, których wymiary gabarytowe muszą być tego samego rzędu co grubości odpowiednich warstw izolacyjnych. Powoduje to z reguły przekroczenie dopuszczalnej granicy ilości elementów i węzłów, nawet w przypadku programów zainstalowanych na stacjach roboczych (np. system COSMOS/M v.1.70 w wersji na stację roboczą umożliwia budowę modeli zawierających do 65000 elementów). Cienkich warstw izolacji nie można pominąć w modelu, bowiem na nich występują największe spadki temperatur (ze względu na bardzo małą wartość przewodności cieplnej właściwej materiałów izolacyjnych w stosunku do przewodności miedzi i stali beczki wirnika).

Najnowszą tendencją w dziedzinie obliczeń pól temperatury w wirnikach turbogeneratorów jest połączenie metod obliczeniowych polowych oraz obwodowych

Przykładowo w pracy [4] zaprezentowano model cieplny wirnika z bezpośrednim radialnym systemem wentylacji łączący metodę elementów skończonych z metodą sieci rezystancyjnych. Model ten nadaje się jednak do analizy pól temperatur tylko w przypadku radialnego systemu wentylacji i nie ma możliwości jego łatwej adaptacji dla innych systemów.

Celem prezentowanej pracy było opracowanie metody umożliwiającej w sposób jednolity budowę modeli cieplnych wirników turbogeneratorów w przypadku różnych konfiguracji kanałów wentylacyjnych. Ze względu na regularność kształtów poszczególnych elementów wirnika łatwe jest wykorzystanie metody sieci przewodności cieplnych. Poszczególne elementy wirnika (pręty uzwojeń, kliny, zęby itp.) można podzielić na elementy różnicowe (obszary elementarne). Przyjęto, że w punktach centralnych poszczególnych elementów, stanowiących węzły schematu cieplnego, wydzielają się moce odpowiadające stratom mocy w tych elementach. Natomiast sąsiednie węzły schematu są połączone oporami cieplnymi odpowiadającymi oporom cieplnym elementarnych obszarów zawartych pomiędzy węzłami.

Wirnik turbogeneratorsa, o chłodzeniu bezpośrednim oraz pośrednim uintensywnionym, posiada wewnątrz zębów lub uzwojeń sieć kanałów wentylacyjnych, wewnątrz których przepływa medium chłodzące (wodór lub powietrze). W zależności od prędkości przepływu, rodzaju medium chłodzącego, wymiarów kanałów przyrost temperatury czynnika chłodzącego w kanale może wynosić od kilkunastu do kilkadziesiąt K. Znaczne przyrosty temperatur czynnika chłodzącego w kanałach są powodem nierównomierności rozkładów temperatury w uzwojeniach, zaś ich wartość decyduje o wartości maksymalnych lokalnych temperatur uzwojeń. Z tego powodu analiza temperatury w wirniku turbogeneratorsa wymaga uwzględnienia przyrostów temperatur medium chłodzącego.

Chcąc przedstawić model cieplny wirnika w postaci jednolitej sieci o strukturze sieci elektrycznej, opracowano zastępczy schemat cieplny dla strugi czynnika przepływającego w kanale wentylacyjnym.

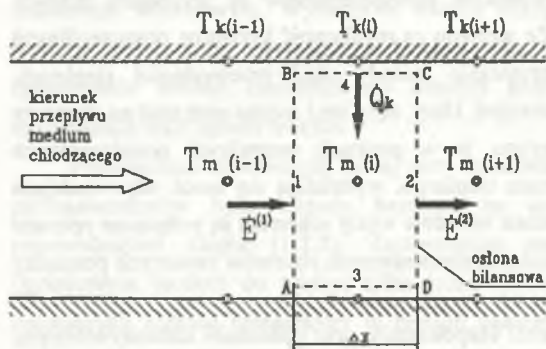
2. OBWODOWY MODEL CIEPLNY DLA STRUGI CZYNNIKA CHŁODZĄCEGO

Opracowując obwodowy model cieplny dla strugi czynnika chłodzącego przepływającego w kanale wentylacyjnym przyjęto następujące założenia upraszczające:

- rozkład temperatury czynnika chłodzącego w kanale wentylacyjnym jest rozkładem jednowymiarowym, co uzasadnia fakt, iż kanały wentylacyjne znajdujące się wewnątrz wirnika turbogeneratorsa mają bardzo małą (w stosunku do długości) średnicę,

- prędkość medium chłodzącego jest stała na całej długości kanału wentylacyjnego,
- w zakresie temperatur oraz ciśnień panujących w generatorze gazy stanowiące medium chłodzące zachowują się jak gaz doskonały.

Na rys.1 przedstawiono fragment kanału wentylacyjnego z zaznaczonymi strumieniami energii oraz strumieniami ciepła przenikającymi przez (nieruchomą względem ścian kanału) osłonę bilansową obejmującą elementarny odcinek kanału o długości Δx .



Rys.1. Bilans strumieni energii strugi czynnika chłodzącego oraz strumieni ciepła dla elementarnego odcinka kanału objętego osłoną bilansową

Fig.1. Balance of energy fluxes for elementary section of ventilation duct

Zgodnie z [5,6] strumień energii $\dot{E}^{(1),(2)}$ strugi substancji przepływającej przez powierzchnie odpowiednio (1) i (2) wynosi:

$$\dot{E}^{(1),(2)} = \dot{m} i_c^{(1),(2)} \quad (1)$$

Natomiast całkowita entalpia właściwa $i_c^{(1),(2)}$ medium chłodzącego przepływającego przez powierzchnię (1) i (2):

$$i_c^{(1),(2)} = i^{(1),(2)} + \frac{w^{(1),(2)2}}{2} + g H^{(1),(2)} \quad (2)$$

gdzie:

\dot{m} - strumień masy medium chłodzącego,

$i_c^{(1),(2)}$ - entalpia właściwa medium chłodzącego przepływającego przez powierzchnię odpowiednio (1) i (2),

$w^{(1),(2)}$ - średnia prędkość medium przepływającego przez powierzchnię (1) i (2),

$H^{(1),(2)}$ - wysokość strugi przepływającej przez powierzchnię (1), (2) ponad przyjęty poziom odniesienia,

g - przyspieszenie ziemskie.

W zakresie temperatur i ciśnień czynnika chłodzącego, występujących w turbogeneratorze, gazy stanowiące medium chłodzące zachowują się praktycznie jak gaz doskonały, a zatem:

$$i^{(1),(2)} = c_p T_m^{(1),(2)} \quad (3)$$

gdzie:

- c_p - pojemność cieplna właściwa medium chłodzącego przy stałym ciśnieniu,
 $T_m^{(1),(2)}$ - temperatura medium chłodzącego przepływającego odpowiednio przez powierzchnię (1), (2).

Strumień ciepła \dot{Q}_k , przepływający drogą konwekcji z elementarnego odcinka powierzchni kanału do medium chłodzącego, jest wyznaczany z relacji:

$$\dot{Q}_k = k u (T_k(i) - T_m(i)) \Delta x \quad (4)$$

gdzie:

- $T_m(i), T_k(i)$ - temperatury węzła i-tego umieszczonego w centralnym punkcie elementu różnicowego wewnątrz kanału oraz na powierzchni kanału,
 k - konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła,
 u - obwód kanału.

Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki dla stanu ustalonego:

$$\dot{E}^{(1)} - \dot{E}^{(2)} + \dot{Q}_k = 0 \quad (5)$$

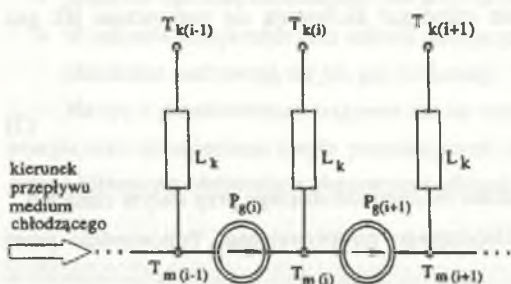
Zakładając, że energia kinetyczna oraz energia potencjalna strugi czynnika wpływającego oraz wypływającego z elementarnego obszaru kanału objętego osłoną bilansową jest taka sama ($w^{(1)} = w^{(2)}$; $H^{(1)} = H^{(2)}$), po podstawieniu równań (1)+(4) do równania (5) i uporządkowaniu otrzymano relację:

$$L (T_{m(i-1)} + T_{m(i)}) - L (T_{m(i)} + T_{m(i+1)}) + A_k (T_{k(i)} - T_{m(i)}) = 0 \quad (6)$$

gdzie:

- $L = \frac{m c_p}{2}$ - współczynnik określający wydatek źródeł mocy cieplnych występujących w cieplnym modelu obwodowym strugi,
 $A_k = k u \Delta x$ - przewodność dla ruchu ciepła drogą konwekcji z elementarnego odcinka kanału do medium chłodzącego przepływającego wewnątrz kanału,

której odpowiada schemat zastępczy przedstawiony na rys. 2.



Rys.2. Obwodowy model cieplny dla strugi czynnika chłodzącego przepływającego w kanale wentylacyjnym

Fig.2. Thermal/electrical resistance diagram for a stream of cooling medium flowing in a ventilating duct

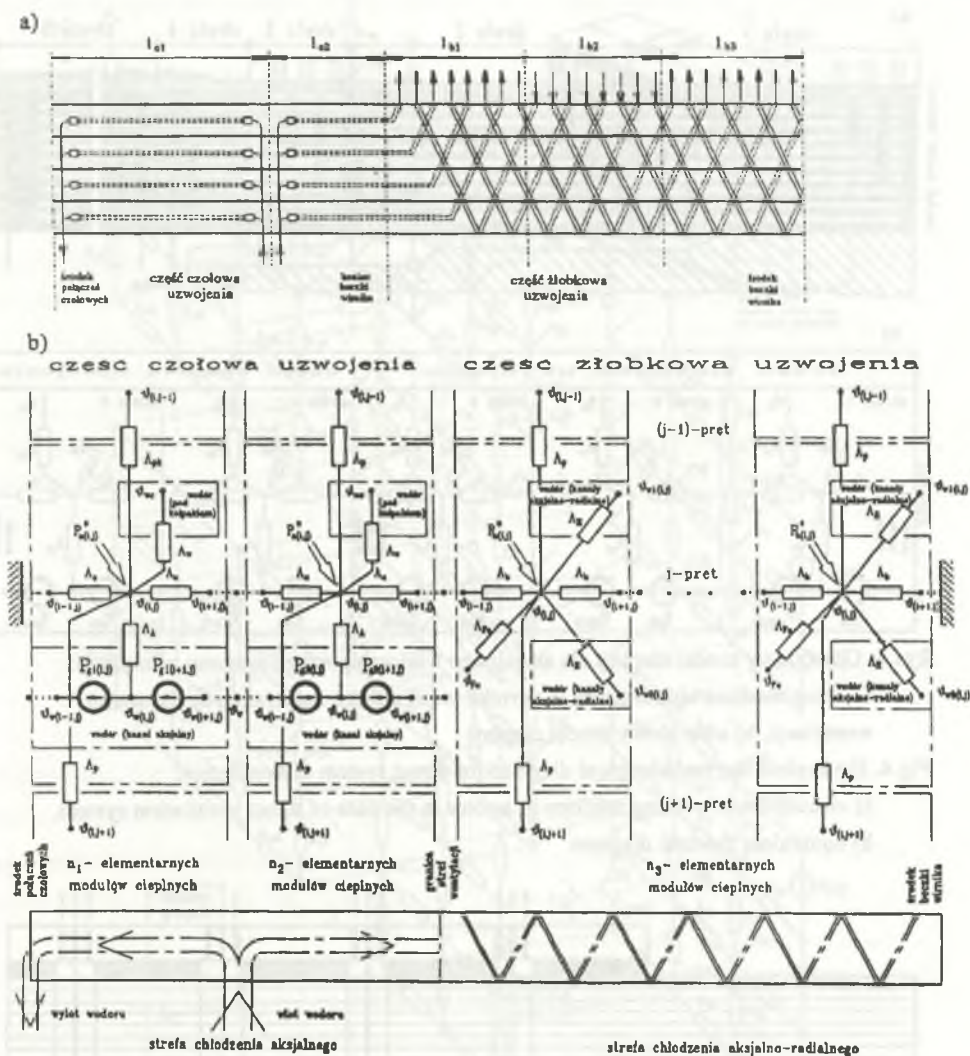
3. WYBRANE OBWODOWE MODELE CIEPLNE DLA RÓŻNYCH SYSTEMÓW WENTYLACJI UZWOJEŃ WIRNIKA

Na rys.3+5 przedstawiono obwodowe modele cieplne (opracowane z wykorzystaniem obwodowego modelu cieplnego strugi czynnika chłodzącego) dla zabierakowego, radialnego oraz aksjalnego systemu wentylacji uzwojeń.

Obwodowy model cieplny dla zabierakowego systemu wentylacji widoczny na rys.3b omówiono szczegółowo w pracy [3]. Schematy cieplne opracowane dla części czołowych uzwojenia (chłodzonych w sposób aksjalny) stały się następnie bazą do opracowania obwodowego modelu cieplnego w przypadku aksjalnego wielostrugowego systemu wentylacji widocznego na rys.4b. W tym przypadku zarówno część czołowa, jak i część żłobkowa uzwojenia jest chłodzona za pośrednictwem medium przepływającego w kanałach aksjalnych (wykonanych wewnątrz poszczególnych prętów elementarnych).

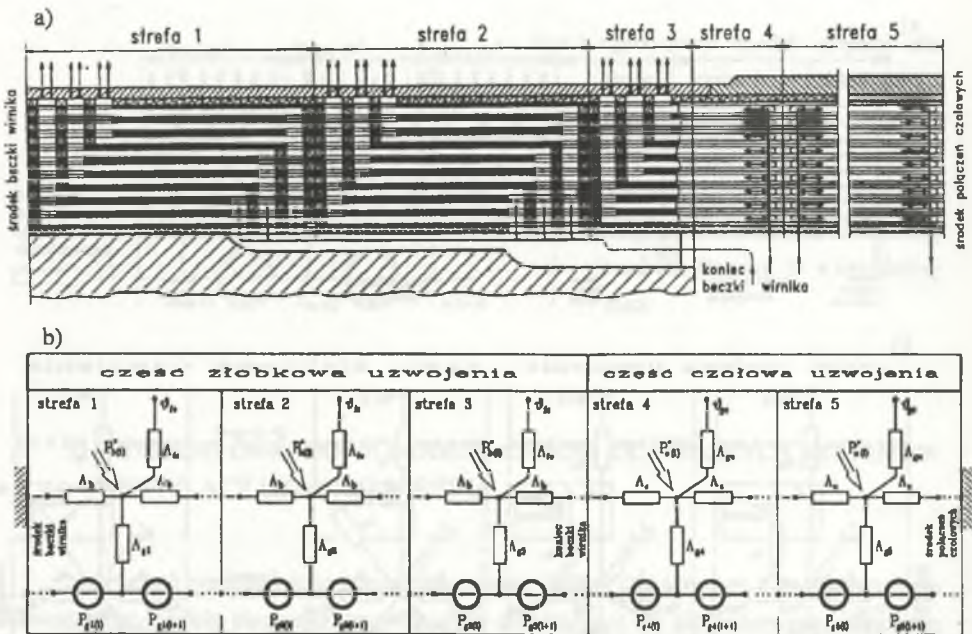
Schemat rozmieszczenia kanałów wentylacyjnych w przypadku radialnego systemu wentylacji uzwojenia wzbudzenia przedstawiono na rys.5.

W przypadku radialnego układu wentylacji obszar wirnika ograniczony płaszczyznami symetrii (widoczny na rys.6a) został podzielony na elementy różnicowe. Poszczególne elementy różnicowe, powstałe w wyniku podziału prętów uzwojenia, klina oraz zęba wirnika, skupiono do postaci węzłów widocznych na schemacie przedstawionym na rys.6b. Rozmieszczenie węzłów na schemacie odpowiada ich rozmieszczeniu w poszczególnych elementach fragmentu wirnika widocznego na rys.6a.



Rys.3. Obwodowy model cieplny dla zabierakowego systemu wentylacji uzwojeń:
 a) obieg medium chłodzącego w wirniku w przypadku zabierakowego systemu wentylacji, b) obwodowy model cieplny

Fig.3. Equivalent thermal/electrical diagram for direct system of ventilation:
 a) circulation of cooling medium in a rotor in the case of direct ventilation system, b) equivalent thermal diagram

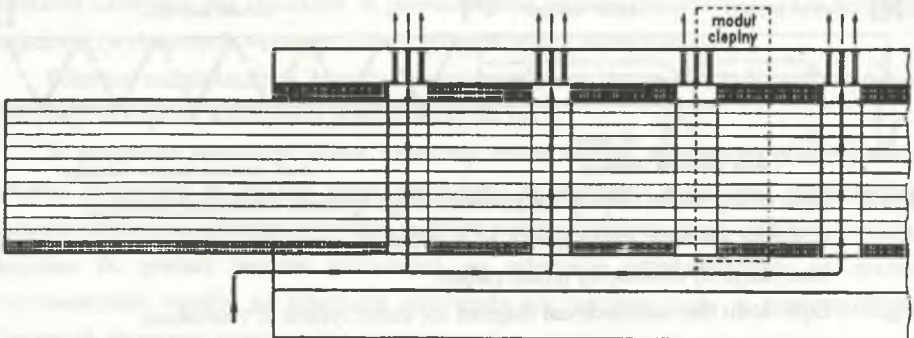


Rys.4. Obwodowy model cieplny dla aksjalnego wielostrugowego systemu wentylacji:

a) obieg medium chłodzącego w wirniku w przypadku zabierakowego systemu wentylacji, b) obwodowy model cieplny

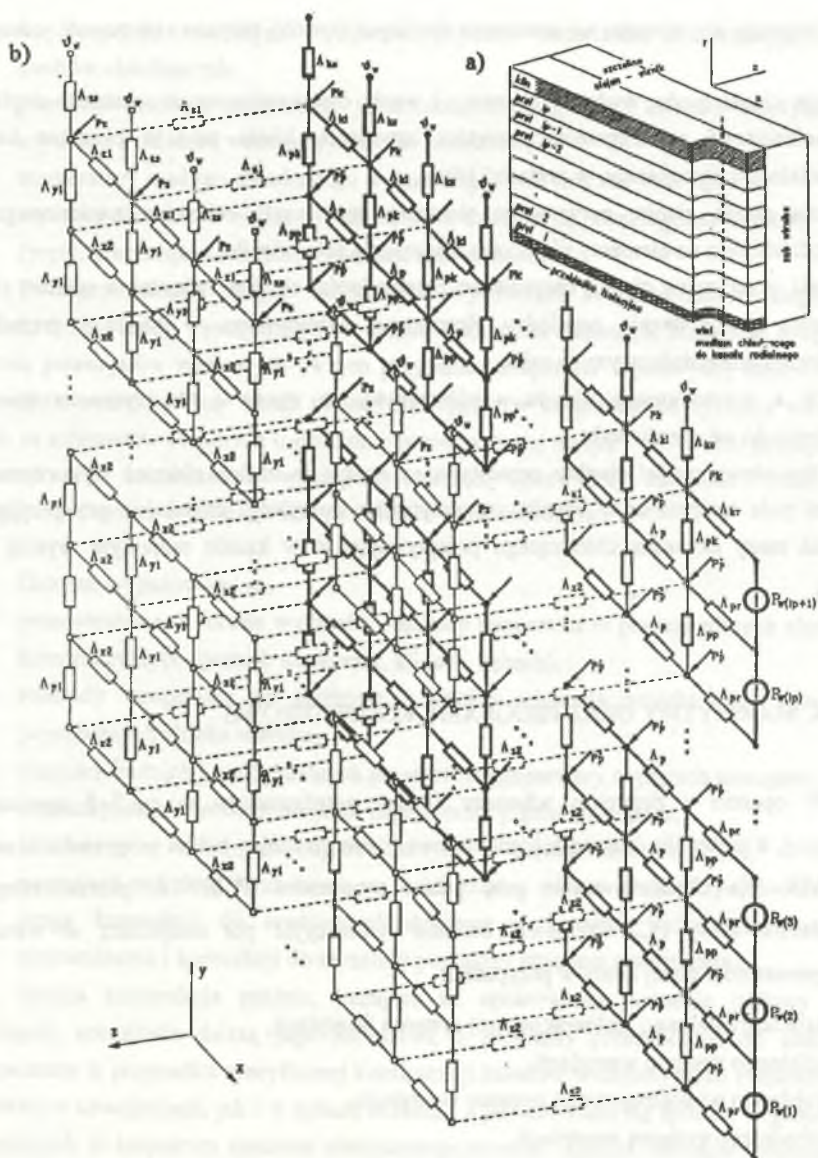
Fig.4. Equivalent thermal/electrical diagram for direct system of ventilation:

a) circulation of cooling medium in a rotor in the case of direct ventilation system, b) equivalent thermal diagram



Rys.5. Schemat rozmieszczenia kanałów wentylacyjnych w przypadku radialnego systemu wentylacji uzwojenia wzbudzenia

Fig.5. Scheme of arrangement of ducts for radial system of ventilation



Rys.6. Obwodowy model cieplny dla radialnego układu wentylacji:

a) obszar wirnika ograniczony płaszczyznami symetrii, b) obwodowy model cieplny

Fig.6. Equivalent thermal/electrical diagram for radial system of ventilation:

a) rotor area confined by symmetry planes, b) equivalent thermal diagram

Elementy występujące na schemacie cieplnym (rys.6b) narysowano trzema rodzajami linii:

- linia ciągła gruba wydziela elementy i węzły dwuwymiarowego schematu cieplnego naniesionego na fragmentach prętów uzwojenia, klinie oraz w obszarze kanału radialnego wykonanego w prętach i klinie,
- linią ciągłą cienką narysowano elementy oraz węzły schematu naniesionego na podzielonym na elementy różnicowe fragmencie zęba wirnika,
- linią przerywaną cienką narysowano przewodności cieplne związane z ruchem ciepła drogą przewodzenia pomiędzy elementami różnicowymi w klinie i prętach, a elementami różnicowymi w zębie.

Oś x prostokątnego układu współrzędnych na rys.6a i 6b wyznacza kierunek równoległy do osi obrotu wału.

Obwodowy model cieplny przedstawiony na rys.6b można również wykorzystać do obliczeń pola temperatur w wirniku, w przypadku wentylacji pośredniej, gdy przyjąć, że strumień masy czynnika chłodzącego przepływającego w kanale radialnym wynosi zero ($m=0$).

4. ALGORYTMY ORAZ PROGRAMY KOMPUTEROWE

W oparciu o zastępcze schematy cieplne przedstawione na rys.3+5 opracowano algorytmy, a następnie programy komputerowe tworzące spójny pakiet programów o nazwie TEMWIR. Na obecnym etapie prac pakiet programów TEMWIR, przeznaczony dla komputerów klasy PC, umożliwia badania symulacyjne pól temperatur w wirnikach turbogeneratorów dużej mocy w przypadku:

- aksjalno-radialnego (zabierakowego) systemu wentylacji,
- radialnego systemu wentylacji,
- aksjalnego wielostrugowego systemu wentylacji,
- pośredniego systemu wentylacji.

Dane wejściowe poszczególnych programów stanowią:

- * wymiary poszczególnych elementów konstrukcyjnych (drutów wchodzących w skład prętów, klinów, zębów),

- * współczynniki określające własności fizyczne materiałów konstrukcyjnych oraz mediów chłodzących,
- * prędkości medium chłodzącego w poszczególnych grupach kanałów wentylacyjnych uzyskane z obliczeń wentylacyjnych lub pomiarów,
- * temperatury medium chłodzącego w poszczególnych strefach wentylacji,
- * wymiary elementów różnicowych, na które dzielone są poszczególne elementy wirnika (pręty, kliny, zęby) lub liczby podziału tych elementów.

Po wprowadzeniu danych wejściowych wyznaczane są przewodności cieplne oraz wydatki źródeł mocy występujących w węzłach schematu cieplnego. Następnie w oparciu o metodę potencjałów węzłowych (w tym przypadku temperatur węzłowych) budowany jest, a następnie rozwiązywany układ równań opisujący (w zależności od systemu wentylacji) jeden ze schematów cieplnych o strukturze przedstawionej na rys.3+5. W celu przyśpieszenia obliczeń oraz zmniejszenia wymaganej pamięci operacyjnej komputera zastosowano specjalne procedury rozwiązywania powstałych układów równań.

Danymi wyjściowymi są:

- * przedstawione w formie wykresów rozkłady temperatur w poszczególnych elementach konstrukcyjnych (prętach uzwojenia, klinach, zębach),
- * rozkłady temperatur na istotnych z punktu widzenia projektowego przekrojach poprzecznych żłobka wirnika,
- * wartości średnich i maksymalnych przyrostów temperatury w prętach uzwojenia,
- * współczynniki nierównomierności nagrzewania prętów uzwojenia,
- * bilanse mocy cieplnych odprowadzanych z prętów uzwojenia (np. w układzie wentylacji radialnej wyznaczane są moce cieplne odprowadzane z prętów uzwojenia drogą konwekcji do medium chłodzącego w kanałach radialnych oraz drogą przewodzenia i konwekcji do szczeliny pomiędzy stojanem a wirnikiem).

Spójna konstrukcja pakietu, bazująca na opracowanej metodzie budowy modeli cieplnych, umożliwia dalszą jego rozbudowę o programy przeznaczone do analizy pól temperatury w przypadku specyficznej konfiguracji kanałów wentylacyjnych (umieszczonych zarówno w uzwojeniach, jak i w zębach wirnika), z jakimi można się spotkać w generatorach pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym. Analiza rozkładu temperatur jest możliwa w przypadku mediów chłodzących wodoru oraz powietrza.

Bardziej szczegółowy opis algorytmu oraz programu komputerowego do obliczeń pola temperatur w przypadku zabierakowego układu przedstawiono w pracy [3].

5. WERYFIKACJA POMIAROWA WYNIKÓW OBLICZEŃ

Ze względu na brak, w wirnikach turbogeneratorów, czujników mierzących lokalne przyrosty temperatury istnieje praktycznie jedynie możliwość częściowej weryfikacji wyników obliczeń. Weryfikacja wyników obliczeń opiera się na porównaniu średnich przyrostów temperatur dla całego uzwojenia, obliczonych oraz zmierzonych metodą oporową.

Rozkłady przyrostów temperatury w wirniku turbogeneratorsa TWW-200-2A z zabierakowym systemem wentylacji uzwojenia wraz z weryfikacją pomiarową przedstawiono w artykule [3].

W generatorach typu TW-50-2 stosowany jest pośredni system wentylacji uzwojenia wzbudzenia. Do analizy rozkładów temperatury przy tym systemie wentylacji można wykorzystać obwodowy model cieplny przedstawiony na rys.5 ($m=0$, gdzie m - oznacza strumień masy medium chłodzącego w kanale radialnym). Wyniki weryfikacji pomiarowej zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Medium chłodzące	Prąd wzbudzenia [A]	Średni przyrost temperatury [K]	
		pomiar	obliczenia
wodór o ciśnieniu 2 at	508	101	100
	533	102	106
	350	88	71.1
powietrze o ciśnieniu 1 at	460	125	126
	421	114	112
	356	100	96
	284	80	80

WNIOSKI

W oparciu o obwodowy model cieplny dla strugi czynnika chłodzącego (rys.2) istnieje możliwość budowy cieplnych modeli obwodowych wirników generatorów w przypadku różnych konfiguracji kanałów wentylacyjnych umieszczonych w uzwojeniach oraz zębach wirnika. Opracowana metoda sprowadzania zagadnień analizy pola cieplnego do problemu rozwiązywania sieci elektrycznych umożliwia wykorzystanie standardowych algorytmów

oraz procedur rozwiązywania sieci elektrycznych (w tym również wyspecjalizowanych programów do rozwiązywania dużych sieci elektrycznych).

Przeprowadzona częściowa weryfikacja modeli cieplnych wykazuje zadowalającą zgodność pomiędzy wynikami pomiarów a wynikami symulacji przeprowadzonych z pomocą prezentowanych modeli.

LITERATURA

1. Bytnar A., Przybysz J.: Pola temperatur generatora 500 MW. *Przegląd Elektrotechniczny*, z.8-9/1980.
2. Iordache M., Voicu N.: A method for thermal field determination in turbogenerator rotors with direct cooling. *International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, Zurich, Switzerland, 1985.
3. Krok R., Miksiewicz R.: Analiza pola temperatur w uzwojeniu wzbudzenia generatora synchronicznego z chłodzeniem bezpośrednim zabierakowym. *XXXI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Maszyny Synchroniczne*, Ustroń 20-23 wrzesień 1995.
4. Latek W., Przybysz J.: Rozkład temperatur w uzwojeniu wirnika turbogeneratora z chłodzeniem bezpośrednim zabierakowym. *Archiwum Elektrotechniki*, zeszyt 3, 1969.
5. Matusiak R.: Określenie osiowego rozkładu temperatury pręta wirnika turbogeneratora z chłodzeniem bezpośrednim poosiowym w stanie cieplnie ustalonym. *Archiwum Elektrotechniki*, zeszyt 2, 1962.
6. Składzień J.: *Termodynamika i termokinetyka*. Skrypt Uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1213, Gliwice 1985.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy HICKIEWICZ, prof. WSI Opole

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 lutego 1996 r.

Abstract

This paper presents an original method for modelling of thermal fields in rotors of high-power turbogenerators consisting in the development of the method of resistance networks. An equivalent thermal diagram for stream of cooling medium taking into account the effect of heat by gas flowing in a ventilating duct has been worked out. The combination of the conventional method of resistance networks with the equivalent thermal diagram for a stream of cooling medium enables the construction of thermal models for various systems of

ventilation and for any configuration of ventilating ducts made both in windings and in rotor teeth.

The possibility of using the widespread available procedures designed to solve electric networks for solving the model is what allows computer programs for different versions of ventilation systems to be easily worked out and calculations to be quickly made.

In order to present the thermal model of a rotor as a uniform network having a structure of an electric network, an equivalent thermal/electrical diagram (Fig.2) has been worked out. Equivalent thermal electrical resistans diagrams for various ventilation systems of windings: driving direct system (Fig.3), axial system (Fig.4), and radial system (Fig.6) have been determined when making use of the circuital thermal model for cooling medium stream (Fig.2).

A package of computer programs for calculation of thermal fields in turbogenerator rotors when using hydrogen or air as a cooling medium has been developed basing on the thermal models worked out for various ventilation system.

The paper to present results of calculations and measurements for various ventilation systems. Owing to the satisfactory concurrence between results of computer simulations and results of measurements the developed package of programs is used at present as an element of computer aided designing of rotors of turbogenerators with rated powers of 30 to 200 MW.