

Roman KROK, Roman MIKSIEWICZ
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

PORÓWNANIE SKUTECZNOŚCI CHŁODZENIA WIRNIKÓW TURBOGENERATORÓW Z AKSJALNYM I ZABIERAKOWYM SYSTEMEM CHŁODZENIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono model cieplny oraz przykładowe obliczenia wirnika turbogeneratora z aksjalnym, wielostrugowym systemem chłodzenia. Model cieplny i schemat zastępczy opracowano metodą różnic skończonych, wykorzystując interpretację układu równań różnicowych przewodnictwa ciepła w postaci sieci cieplno-elektrycznej. Porównano i wskazano na istotne różnice w rozkładach temperatur w wirnikach turbogeneratorów o mocy 200 MW z aksjalnym, wielostrugowym oraz zabierakowym systemem chłodzenia.

COMPARISON OF COOLING EFFICIENCY OF TURBOGENERATOR ROTORS WITH AXIAL AND DIRECT DIAGONAL SYSTEMS OF VENTILATION

Summary. The paper presents the thermal model and exemplary calculation of turbogenerator rotor with axial multistream ventilation system. The thermal model and equivalent diagram have been worked out basing on the method of finite differences using interpretation of the system of difference equations of the heat conduction in the form of the thermal-electrical network. Temperature distributions in 200 MW turbogenerator rotors with axial multistream (with one or two subslot ducts) and direct diagonal systems of ventilation have been compared. The essential differences between them have been noted.

1. WSTĘP

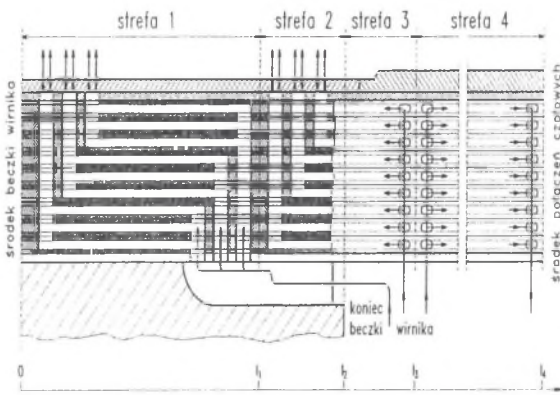
Modele cieplne maszyn elektrycznych mogą być wykorzystywane do obliczeń stanów cieplnie ustalonych i nieustalonych. Powinny być one tak skonstruowane, aby przy zapewnieniu odpowiedniej dokładności umożliwić obliczenia cieplne wspomagające projektowanie systemów chłodzenia, jak i coraz częściej monitorowanie temperatur w czasie eksploatacji maszyny. Wykonywanie obliczeń przy użyciu profesjonalnych programów bazujących na MES jest do tej pory praktycznie niemożliwe w przypadku monitorowania na

bieżąco rozkładów temperatur. Autorzy, opierając się na metodzie różnic skończonych [8], opracowali modele obwodowe do obliczeń pól temperatury w wirnikach turbogeneratorów o różnych systemach chłodzenia [2÷6] oraz przy zastosowaniu różnych mediów chłodzących (wodór, powietrze). Zastosowanie metody różnic skończonych umożliwia sprowadzenie równań przewodnictwa ciepła opisujących rozkłady temperatury w prętach elementarnych uzwojenia wzbudzenia oraz w medium chłodzącym przepływającym w kanałach wentylacyjnych do postaci równań różnicowych. Interpretację układu równań różnicowych opisujących pole temperatury w wirniku stanowią sieci cieplno-elektryczne, które opracowano dla różnych systemów wentylacji. Prowadzone prace nad procedurami obliczeniowymi złożonych sieci cieplno-elektrycznych doprowadziły do opracowania własnych algorytmów ich rozwiązywania znacznie przyspieszających proces obliczeń [2÷6] oraz zmniejszających wymagania odnośnie pojemności pamięci operacyjnej. Zaletą opracowanego oprogramowania jest możliwość stosowania go zarówno do wspomagania projektowania wirników turbogeneratorów o różnych systemach chłodzenia, jak i monitorowania rozkładu temperatury w wirniku na bieżąco podczas eksploatacji generatora.

W artykule przedstawiono bardziej szczegółowo model cieplny wirnika turbogeneratora z aksjalnym, wielostrugowym systemem chłodzenia. Porównano i wskazano na istotne różnice w rozkładach temperatur w wirnikach turbogeneratorów o mocy 200 MW z aksjalnym, wielostrugowym oraz zabierakowym systemem chłodzenia.

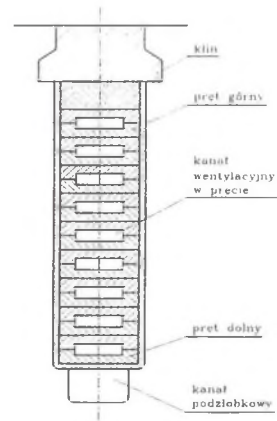
2. MODEL CIEPLNY I PROGRAM KOMPUTEROWY DO OBLICZEŃ POLA TEMPERATURY W WIRNIKU TURBOGENERATORA Z AKSJALNYM, WIELOSTRUGOWYM SYSTEMEM CHŁODZENIA

Rozmieszczenie kanałów wentylacyjnych w wirniku turbogeneratora z aksjalnym, wielostrugowym systemem chłodzenia przedstawiono na rys.1 (przekrój wykonano wzdłuż prętów w obrębie ćwiartki uzwojenia wzbudzenia, natomiast początek układu współrzędnych umieszczono w środku odkuwki wirnika), zaś na rys.2 przedstawiono przekrój poprzeczny żłobka wirnika z widocznymi kanałami aksjalnymi w prętach elementarnych uzwojenia wzbudzenia. Oznaczenia długości poszczególnych stref wentylacji, na zamieszczonych w dalszej części wykresach temperatur, są zgodne z oznaczeniami wprowadzonymi na rys.1.



Rys.1. Rozmieszczenie kanałów wentylacyjnych w uzwojeniu wzbudzenia dla aksjalnego, wielostrugowego systemu chłodzenia wirnika

Fig.1. Arrangement of ventilation ducts in the excitation winding for axial multistream ventilation system



Rys.2. Przekrój żłobka wirnika
Fig.2. Cross section of the rotor slot

Zasadniczym elementem aksjalnego systemu chłodzenia [1, 7, 9] są kanały wykonane w prętach uzwojenia. Każdy z prętów składa się z dwóch połówek (rys.2) o przekroju poprzecznym w kształcie litery "C". W wyniku złożenia tych połówek we wnętrzu pręta powstaje kanał chłodzący. W celu zapewnienia większej skuteczności chłodzenia prętów uzwojenia, system kanałów chłodzących podzielono na strefy, do których medium chłodzące jest wprowadzone równoległe. Uzyskane w ten sposób skrócenie drogi przepływu medium chłodzącego w prętach powoduje mniejsze jego nagrzewanie, a co za tym idzie, zapewnia większą skuteczność chłodzenia.

Do stref chłodzenia znajdujących się w obszarze żłobkowym uzwojenia medium chłodzące jest wprowadzane za pośrednictwem kanałów podłożkowych, wyprowadzane z tych stref następnie do szczeliny stojan-wirnik.

W części czołowej uzwojenia (podobnie jak w części żłobkowej), w prętach wykonane są aksjalne kanały chłodzące. Medium chłodzące jest doprowadzane i wyprowadzane z tych kanałów za pośrednictwem grup otworów znajdujących się na powierzchni bocznej prętów. Odpowiednio ukształtowane przegrody pod kołpakiem podczas wirowania wirnika powodują powstanie nadciśnienia w określonych obszarach pod kołpakiem, co wymusza rozprływ medium chłodzącego na poszczególne grupy kanałów.

Opracowując model cieplny dla aksjalnego, wielostrugowego systemu chłodzenia uwzględniono przepływy ciepła wywołane:

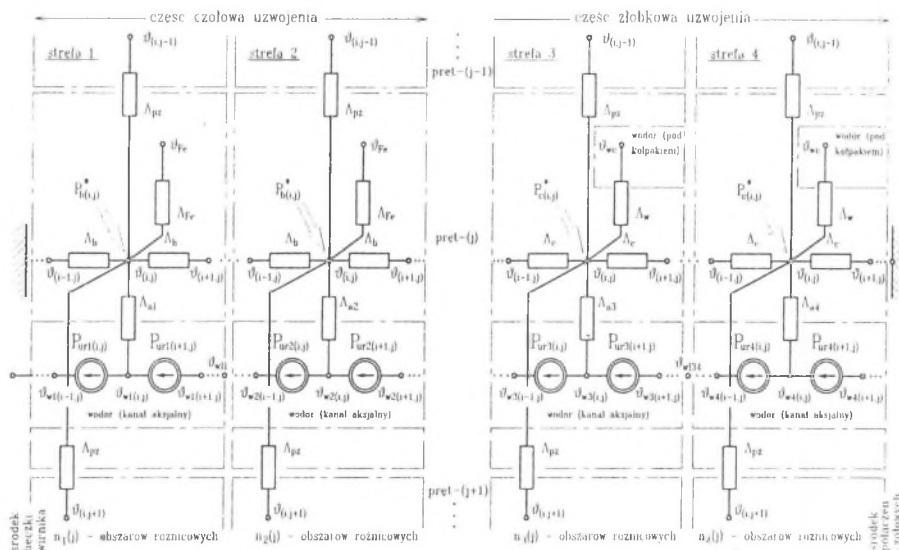
- przewodzeniem ciepła:
 - wzdłuż prętów uzwojenia wzbudzenia,

- przez przekładki izolacyjne umieszczone pomiędzy prętami uzwojenia,
- przez izolację żłobkową,
- wnikaniem ciepła na skutek konwekcji z powierzchni:
 - kanałów aksjalnych w części żłobkowej uzwojenia do medium chłodzącego przepływającego w tych kanałach,
 - kanałów aksjalnych w części czołowej uzwojenia do medium chłodzącego przepływającego w tych kanałach,
 - prętów uzwojenia w części czołowej do medium chłodzącego przepływającego pod kołpakiem,
- unoszeniem ciepła przez medium chłodzące przepływające w kanałach wentylacyjnych.

Opracowując model cieplny przyjęto następujące założenia upraszczające:

- pominięto przepływ ciepła przez grube przekładki izolacyjne znajdujące się na dnie żłobka,
- pominięto straty w klinach żłobkowych oddzielonych od uzwojenia grubymi przekładkami izolacyjnymi, przez co nie mają one praktycznie wpływu na rozkład temperatury w uzwojeniu,
- pominięto przepływ ciepła wzdłuż cienkich przekładek izolacyjnych umieszczonych pomiędzy prętami uzwojenia, mający znikomo małą wartość w stosunku do przepływu ciepła wzdłuż prętów uzwojenia,
- pominięto spadki temperatury w prętach uzwojenia wywołane przepływem ciepła w kierunku prostopadłym do prętów, mające znikomo małą wartość w stosunku do spadków temperatury wywołanych przez ten przepływ w przekładkach izolacyjnych umieszczonych pomiędzy prętami,
- przewodność cieplna właściwa materiału uzwojenia, izolacji oraz współczynnik wnikania ciepła do medium chłodzącego nie zależą od temperatury.

Model cieplny wirnika turbogeneratorsa z aksjalnym wielostrugowym systemem chłodzenia opracowano opierając się na metodzie różnic skończonych [2÷6,8], wykorzystując interpretację układu równań różnicowych przewodnictwa ciepła w postaci sieci cieplno-elektrycznej. Na rys.3 przedstawiono strukturę sieci cieplno-elektrycznej.



Rys.3. Struktura zastępczego schematu cieplnego dla aksjalnego, wielostrugowego systemu chłodzenia

Fig.3. Equivalent thermal-electrical network for the axial multistream ventilation system of turbogenerator rotor

Poszczególne strefy uzwojenia, zasilane w sposób równoległy medium chłodzącym, podzielono na obszary różnicowe. Obszarom różnicowym, zawartym w poszczególnych strefach wentylacji, odpowiadają zastępcze schematy cieplne. Liczby podziału prętów uzwojenia i kanałów wentylacyjnych w poszczególnych strefach dobrano eksperymentalnie zwiększając je i porównując zmiany temperatur w węzłach schematu. Zostały one tak dobrane, aby zapewnić dokładność obliczeń numerycznych na poziomie 0.1 K. Ostatecznie sieć cieplno-elektryczna wykorzystywana w obliczeniach cieplnych w tym przypadku zawiera 2000 węzłów.

Wielkości znajdujące się na zastępczym schemacie cieplnym oznaczają:

- przewodności dla ruchu ciepła drogą przewodzenia,
 - pomiędzy sąsiednimi prętami uzwojenia - Λ_{pz} ,
 - wzdłuż prętów uzwojenia odpowiednio w częściach żłobkowej i czołowej - Λ_b, Λ_c ,
 - z prętów uzwojenia do odkuwki wirnika - Λ_{Fv} ,
- przewodności dla ruchu ciepła drogą konwekcji,
 - z powierzchni prętów w części czołowej do wodoru przepływającego w przestrzeni pod kołpakami - Λ_w ,
 - z powierzchni kanałów aksjalnych w prętach uzwojenia w poszczególnych strefach wentylacji do przepływającego w nich wodoru - $\Lambda_{a1}, \Lambda_{a2}, \Lambda_{a3}, \Lambda_{a4}$,

- moce ciepłe związane z unoszeniem ciepła przez medium chłodzące przepływające pomiędzy sąsiednimi obszarami różnicowymi kanału wentylacyjnego, w kolejnych strefach wentylacji - $P_{ur1(i,j)}, P_{ur2(i,j)}, P_{ur3(i,j)}, P_{ur4(i,j)}$,
- straty generowane w poszczególnych obszarach różnicowych, na które podzielone zostały pręty uzwojenia (zależne od przyrostów temperatury w tych obszarach), odpowiednio w części żłobkowej i czołowej uzwojenia - $P_{b(i,j)}^*, P_{c(i,j)}^*$.

Równanie bilansu mocy cieplnej dla i-tego obszaru różnicowego j-tego pręta, w pierwszej strefie wentylacji ma postać:

$$P_{b(i,j)}^* - A_{pz}(\Delta\vartheta_{(i,j)} - \Delta\vartheta_{(i,j-1)}) - A_{pz}(\Delta\vartheta_{(i,j)} - \Delta\vartheta_{(i,j+1)}) - A_b(\Delta\vartheta_{(i,j)} - \Delta\vartheta_{(i-1,j)}) - A_b(\Delta\vartheta_{(i,j)} - \Delta\vartheta_{(i+1,j)}) - A_{Fe}(\Delta\vartheta_{(i,j)} - \Delta\vartheta_{Fe}) - A_{al}(\Delta\vartheta_{(i,j)} - \Delta\vartheta_{w(i-1,j)}) = 0, \quad (1)$$

zaś dla medium chłodzącego przepływającego w i-tym obszarze różnicowym kanału aksjalnego w j-tym pręcie:

$$-P_{ur1(i,j)} + P_{ur1(i+1,j)} - A_{al}(\Delta\vartheta_{w1(i-1,j)} - \Delta\vartheta_{(i,j)}) = 0. \quad (2)$$

Natomiast układ równań opisujący całą sieć ciepłno-elektryczną:

$$[A] [\Delta\vartheta] = [P] \quad (3)$$

gdzie:

- $[A]$ - macierz przewodności cieplnych,
- $[\Delta\vartheta]$ - wektor przyrostów temperatur w elementach różnicowych,
- $[P]$ - wektor mocy generowanych w obszarach różnicowych.

Opracowana sieć ciepłno-elektryczna rozwiązywana jest metodą potencjałów (tutaj temperatur) węzłowych. W celu przyspieszenia obliczeń opracowano własny algorytm rozwiązywania opracowanej sieci cieplnej. W algorytmie tym zastosowano, specjalnie do tego celu opracowaną, iteracyjną metodę rozwiązywania układu równań (3), odpowiadającego sieci cieplnej. Duża zbieżność algorytmu pozwoliła rozwiązywać sieć cieplną zawierającą 2000 węzłów w czasie ok. 4.5 min. (na komputerze z procesorem Intel Pentium II 266 MHz). Zastosowane rozwiązania w algorytmie obliczeń numerycznych umożliwiają wydatnie zmniejszyć również wymaganą pamięć operacyjną, dzięki czemu program może być instalowany na komputerach klasy PC. Na podstawie algorytmu obliczeń opracowano program komputerowy, który uwzględnia istniejącą w wirniku liczbę równoległe chłodzonych odcinków uzwojenia. Uwzględnienie w modelu cieplnym nagrzewania gazu przepływającego w kanałach wentylacyjnych oraz zjawiska unoszenia ciepła w strugach tego gazu pozwala wyznaczyć rozkłady przyrostów temperatury w poszczególnych elementach wirnika oraz istotne z punktu widzenia oceny zagrożeń termicznych - maksymalne przyrosty temperatury.

Obliczenia ciepłe uzwojenia wirnika zweryfikowano pomiarowo dla kilku stanów obciążenia turbogeneratora. Opierając się na pomiarze przyrostu rezystancji uzwojenia wzbudzenia wyznaczono średni przyrost temperatury tego uzwojenia. Uzyskane z obliczeń

średnie przyrosty temperatury uzwojenia wzbudzenia dla wszystkich zrealizowanych stanów pracy generatora są większe od zmierzonych, zaś względna odchyłka wyników obliczeń w odniesieniu do wyników pomiarów nie przekracza 10%. Opracowany model cieplny zapewnia więc dobrą, z punktu widzenia zastosowań praktycznych, dokładność obliczeń.

3. PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ ROZKŁADÓW TEMPERATURY W WIRNIKACH TURBOGENERATORÓW Z SYSTEMAMI CHŁODZENIA AKSJALNYM ORAZ ZABIERAKOWYM

W celu porównania rozkładów temperatur w uzwojeniach wirnika przy różnych systemach chłodzenia przyjęto, że turbogeneratory o mocy 200 MW z zabierakowym i aksjalnym systemem chłodzenia uzwojenia wzbudzenia mają takie same dane znamionowe. Dla tych danych zostały wykonane wszystkie obliczenia cieplne. Odkuwki wirnika oraz wentylatory osadzone na wale w obu turbogeneratorach są jednakowe. Wymiary żłobków wirnika oraz prętów elementarnych uzwojenia wzbudzenia są takie same. W wirniku turbogeneratorsa z aksjalnym systemem chłodzenia wykonane są dodatkowo kanały podżłobkowe, którymi medium chłodzące jest doprowadzane do aksjalnych kanałów wentylacyjnych w strefie żłobkowej uzwojenia. Wirnik turbogeneratorsa z zabierakowym systemem chłodzenia [2, 3÷7, 9] jest wyposażony dodatkowo w specjalnie ukształtowane kliny (zabieraki), których zadaniem jest doprowadzanie i wyprowadzanie medium chłodzącego ze szczeliny stojan-wirnik do kanałów aksjalno-radialnych w strefie żłobkowej uzwojenia.

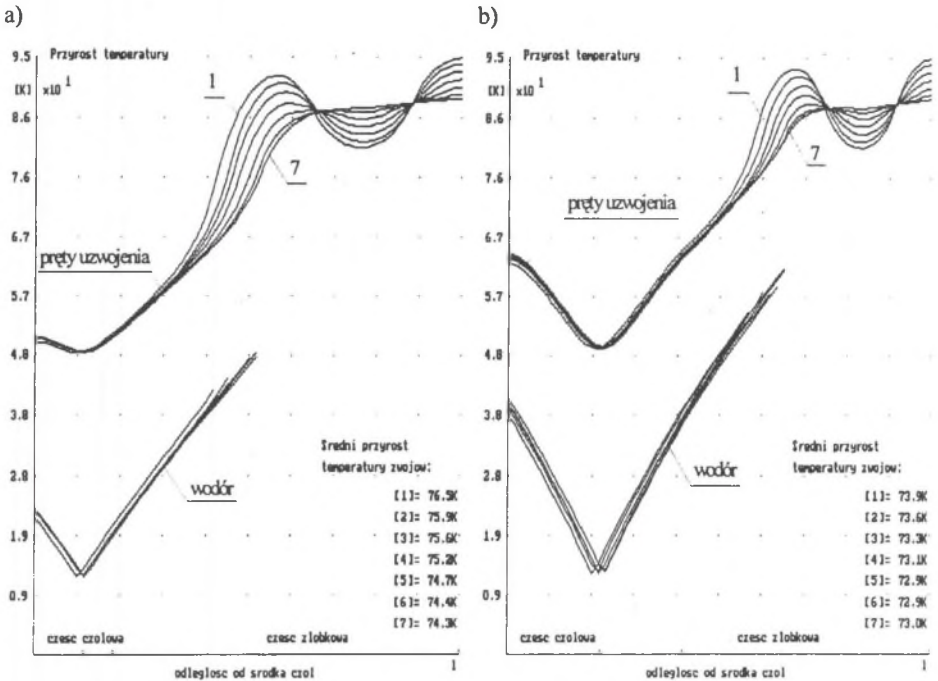
Obliczenia cieplne wykonano dla wirników turbogeneratorsów o mocy 200 MW o danych znamionowych:

$$\begin{aligned} S_n &= 235 \text{ MV}\cdot\text{A}, & P_n &= 200 \text{ MW}, & U_n &= 15,75 \text{ kV}, & I_n &= 8,625 \text{ kA}, \\ U_{fn} &= 300 \text{ V}, & I_{fn} &= 2540 \text{ A}, & \cos \varphi_n &= 0,85. \end{aligned}$$

3.1. System zabierakowy

Większość turbogeneratorsów o mocy znamionowej 200 MW, pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym, ma zabierakowy system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia. Stosując metodę różnic skończonych sporządzono zastępczy schemat cieplny i program komputerowy do obliczeń rozkładu temperatury w prętach elementarnych uzwojenia wzbudzenia oraz w medium chłodzącym przepływającym w kanałach wentylacyjnych. Wyniki tych prac zostały zamieszczone we wcześniejszych publikacjach [2÷6].

Obliczone rozkłady temperatur dla znamionowych warunków pracy generatora przedstawiono na rys.4. Pręty elementarne uzwojenia wzbudzenia ponumerowano w żłobku rozpoczynając od pręta znajdującego się bezpośrednio pod klinem (pręt nr 1), a kończąc na pręcie położonym na dnie żłobka (pręt nr 7).



Rys.4. Rozkłady przyrostów temperatury w prętach uzwojenia wzbudzenia turbogenerators z zabierakowym systemem chłodzenia w znamionowych warunkach pracy:

a) w cewce wewnętrznej (o najkrótszych połączeniach czołowych),

b) w cewce zewnętrznej (o najdłuższych połączeniach czołowych)

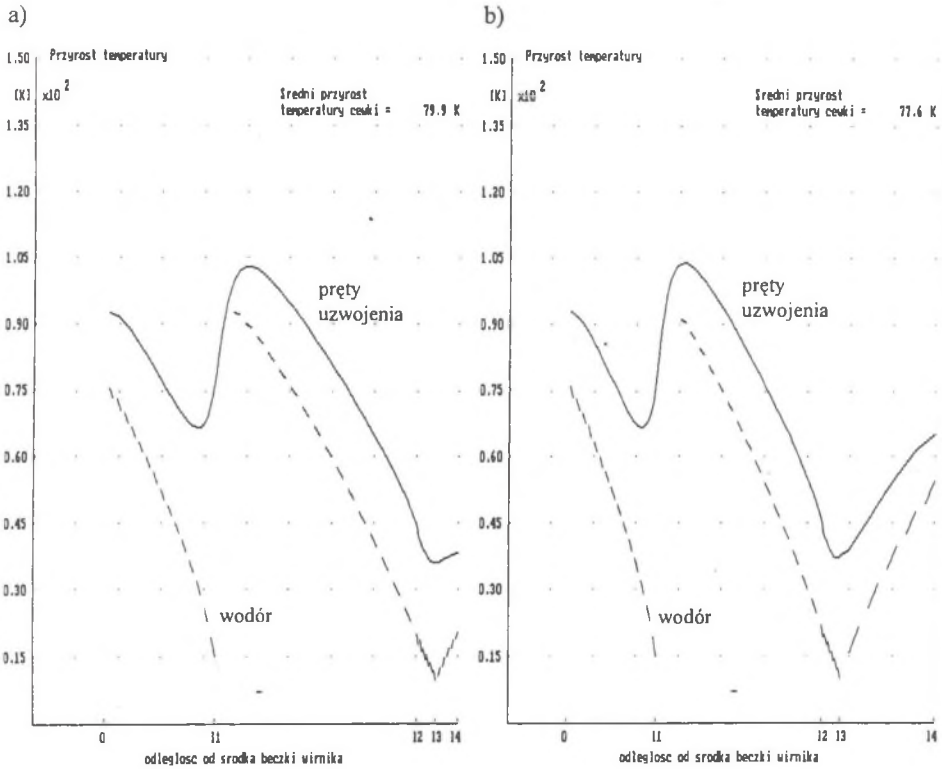
Fig.4. Distributions of temperature rises in the excitation winding of the turbogenerator with direct diagonal ventilation system in rating conditions

a) for inner coil (the shortest end winding),

b) for outer coil (the longest end winding)

3.2. System wielostrugowy z jednostopniowym kanałem podźłobkowym

Na wykresach zamieszczonych na rys.5 przedstawiono rozkłady przyrostów temperatury w prętach uzwojenia (linia ciągła) oraz w wodrze przepływającym w kanałach aksjalnych (linia przerywana), dla aksjalnego systemu chłodzenia z jednostopniowym kanałem podźłobkowym (według przedstawionego wcześniej modelu), dla dwóch cewek uzwojenia.



Rys.5. Rozkłady przyrostów temperatury w cewkach uzwojenia wzbudzenia oraz w wodorze przepływającym w kanałach aksjalnych dla wielostrugowego systemu chłodzenia z jednostopniowym kanałem podźłobkowym w znamionowych pracy:

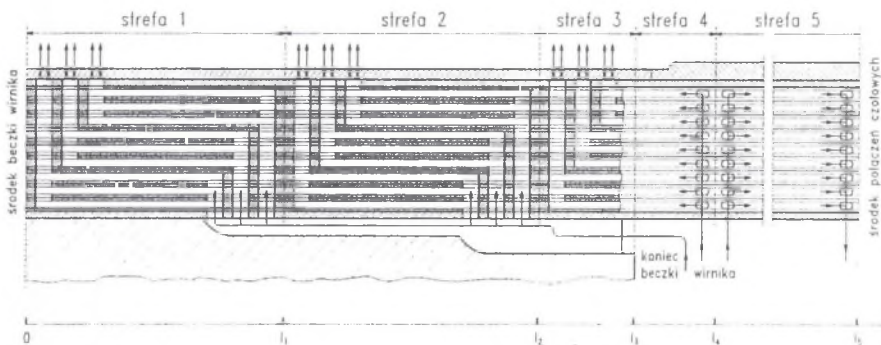
- a) w cewce wewnętrznej (o najkrótszych połączeniach czołowych),
- b) w cewce zewnętrznej (o najdłuższych połączeniach czołowych)

Fig.5. Distributions of temperature rises in the excitation winding of the turbogenerator with axial multistream ventilation system in rating conditions

- a) for inner coil (the shortest end winding),
- b) for outer coil (the longest end winding)

3.3. System wielostrugowy z dwustopniowym kanałem podźłobkowym

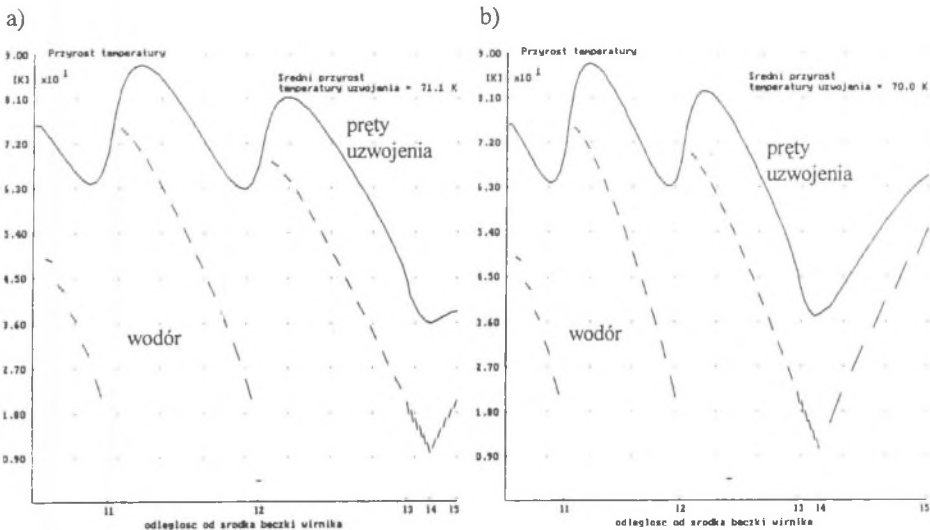
Polepszenie skuteczności chłodzenia w przypadku systemu aksjalnego jest możliwe poprzez zwiększenie ilości stref wentylacji i co za tym idzie, skrócenie drogi przepływu medium chłodzącego w kanałach wentylacyjnych. Opracowano projekt systemu aksjalnego dla wirnika turbogenerators o mocy 200 MW, w którym wprowadzono dodatkowo strefę wentylacji (patrz rys.6) w części żłobkowej uzwojenia. Doprowadzenie medium chłodzącego do dwóch stref wentylacji w części żłobkowej uzwojenia jest możliwe dzięki odpowiednio ukształtowanemu dwustopniowemu kanałowi podźłobkowemu.



Rys.6. Schemat rozmieszczenia kanałów wentylacyjnych w przypadku aksjalnego, wielostrugowego systemu chłodzenia z dodatkową strefą wentylacji w części żłobkowej uzwojenia

Fig.6. Arrangement of ventilation ducts in the excitation winding for axial multistream ventilation system with the additional zone in the slot part of the winding

Zakładając, że prędkości medium chłodzącego w kanałach aksjalnych w prętach elementarnych uzwojenia nie ulegną zmianie, wykonano obliczenia cieplne uzwojenia wzbudzenia dla systemu aksjalnego z dodatkową strefą w części żłobkowej (rys.7) w znamionowych warunkach obciążenia generatora.



Rys.7. Rozkłady przyrostów temperatury w cewkach uzwojenia wzbudzenia oraz w wodrze przepływającym w kanałach aksjalnych dla aksjalnego systemu wentylacji (projekt z dodatkową strefą wentylacji w części żłobkowej) w znamionowych warunkach pracy: a) w cewce wewnętrznej, b) w cewce zewnętrznej

Fig.7. Distributions of temperature rises in the excitation winding of the turbogenerator with axial multistream ventilation system (with the additional zone in the slot part of the winding) in rating conditions: a) for inner coil, b) for outer coil

3.4. Porównanie różnych systemów wentylacji

W tabeli 1 zestawiono maksymalne, średnie przyrosty temperatury uzwojenia wzbudzenia oraz współczynnik nierównomierności rozkładu temperatury k_r turbogeneratorów o mocy 200 MW, uzyskane z obliczeń cieplnych przeprowadzonych dla obu systemów chłodzenia wirnika. Współczynnik nierównomierności rozkładu temperatury zdefiniowano jako stosunek maksymalnego przyrostu temperatury $\Delta \vartheta_{max}$ do średniego przyrostu temperatury $\Delta \vartheta_{sr}$ uzwojenia wzbudzenia:

$$k_r = \frac{\Delta \vartheta_{max}}{\Delta \vartheta_{sr}} \quad (4)$$

Z porównania wyników obliczeń cieplnych (tabela 1) dla dwóch rozpatrywanych wersji systemu chłodzenia wirnika wynika, że system zabierakowy zapewnia mniejsze przyrosty temperatury w uzwojeniu wzbudzenia oraz większą równomierność rozkładu temperatury w porównaniu do systemu aksjalnego z jednostopniowym kanałem podźłobkowym.

Mniejsza nierównomierność rozkładu temperatury oraz mniejszy maksymalny przyrost temperatury w uzwojeniu wzbudzenia w przypadku zabierakowego systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia jest konsekwencją mniejszej długości stref zasilanych równoległe medium chłodzącym. W przypadku aksjalnego systemu chłodzenia długości stref w części żłobkowej uzwojenia wynoszą odpowiednio 0.765 m oraz 1.41 m. Przy zabierakowym systemie chłodzenia długości stref wlotowej i wylotowej w wirniku są praktycznie równe i wynoszą około 0.4 m. Dłuższa droga przepływu medium chłodzącego w kanale powoduje większe przyrosty temperatury medium na wlotach i wylotach z kanałów, czego konsekwencją jest większa nierównomierność rozkładu temperatury w chłodzonym przecię uzwojenia oraz większy maksymalny przyrost temperatury (ilość ciepła odprowadzanego do nagrzanego do wyższej temperatury medium chłodzącego jest mniejsza).

Tabela 1

Porównanie wyników obliczeń temperatur w wirnikach turbogeneratorów o mocy 200 MW dla różnych rozwiązań systemu chłodzenia

Lp.	System chłodzenia wirnika	Przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia		Współczynnik nierównomierności rozkładu temperatury
		maksymalny [K]	średni [K]	
1.	Zabierakowy	95	74,3	1,28
2.	Aksjalny, wielostrugowy	105	78,5	1,34
3.	Aksjalny, wielostrugowy z dodatkową strefą wentylacji w części żłobkowej	88	70,6	1,25

W przypadku aksjalnego systemu chłodzenia maksymalny przyrost temperatury medium chłodzącego pomiędzy miejscami wlotu i wylotu z kanałów wentylacyjnych wynosi 66.9°C , zaś różnica temperatur medium chłodzącego pomiędzy miejscami wlotu i wylotu z kanałów aksjalno-radialnych przy zabierakowym systemie chłodzenia wynosi 22°C . Prędkości medium chłodzącego w kanałach wentylacyjnych w częściach czołowej i żłobkowej uzwojenia w obydwu systemach chłodzenia są praktycznie jednakowe.

System aksjalny, wielostrugowy z dodatkową strefą wentylacji w części żłobkowej uzwojenia zapewnia największą skuteczność chłodzenia uzwojenia wzbudzenia (najmniejszy średni oraz maksymalny przyrost temperatury w uzwojeniu), przy najmniejszej nierównomierności rozkładu temperatury. Zaletą systemu aksjalnego, w odniesieniu do systemu zabierakowego, jest brak zabieraków na powierzchni wirnika zwiększających opory tarcia aerodynamicznego i związane z tym straty mechaniczne. Wadą systemów z kanałem podżłobkowym (zwłaszcza dwustopniowym) jest osłabienie wytrzymałości mechanicznej (wzrost naprężeń) w strefie zębów wirnika.

4. WNIOSKI

Opracowany model cieplny do obliczeń rozkładów temperatury w wirniku turbogeneratorsa z aksjalnym, wielostrugowym systemem chłodzenia zapewnia wystarczającą dla celów praktycznych dokładność obliczeń.

Zaletą opracowanego programu do obliczeń rozkładów temperatur uzwojenia wzbudzenia jest krótki czas obliczeń oraz możliwość jego instalowania na komputerach klasy PC. Program ten może być wykorzystywany do komputerowego wspomagania projektowania wirników turbogeneratorów z aksjalnym, wielostrugowym systemem chłodzenia. Można z jego pomocą stosunkowo szybko wykonać obliczenia i przeprowadzić analizę dla wielu różnych wariantów rozpatrywanych w fazie projektowania. Opracowany program można również przystosować do celów monitorowania rozkładu temperatury w wirniku na bieżąco podczas pracy generatora. Taki system monitorowania nie wymaga instalowania w wirniku czujników do pomiaru lokalnych przyrostów temperatury, zaś do wykonania obliczeń potrzebna jest jedynie znajomość mierzonych podczas eksploatacji generatorów wielkości: prądu wzbudzenia, ciśnienia wodoru, temperatury wodoru na wylocie z chłodnic.

Z porównania dwóch wersji rozwiązań systemów chłodzenia stosowanych w wirnikach turbogeneratorów o mocy 200 MW wynika, że z punktu widzenia rozkładów temperatury system zabierakowy jest bardziej korzystny od aksjalnego z jednostopniowym kanałem podżłobkowym. Zabierakowy system chłodzenia wirnika w porównaniu do systemu aksjalnego zapewnia zarówno mniejszy maksymalny przyrost temperatury w uzwojeniu wzbudzenia, jak i mniejszą nierównomierność rozkładu temperatury.

Wprowadzając w systemie aksjalnym dodatkową strefę wentylacji w części żłobkowej uzwojenia można poprawić skuteczność chłodzenia w przypadku aksjalnego systemu chłodzenia uzyskując zarówno mniejsze przyrosty temperatury, jak i mniejszą nierównomierność rozkładu temperatury w uzwojeniu wzbudzenia w porównaniu do chłodzenia zabierakowego. Brak zabieraków w przypadku chłodzenia aksjalnego i zmniejszenie tym samym strat mechanicznych oraz uzyskanie obniżenia przyrostu temperatury uzwojenia wzbudzenia powodują, że system ten może stanowić konkurencję dla systemu zabierakowego i znaleźć zastosowanie podczas modernizacji wirników turbogeneratorów, których celem jest zwiększenie mocy znamionowych turbogeneratorów.

LITERATURA

1. Glebow I.A., Danilewicz Ja.B.: Naucznyje osnovy projektirowanija turbogeneratorow. Nauka, Leningrad 1986.
2. Krok R.: Wyznaczanie ustalonych i nieustalonych przestrzennych rozkładów temperatury w wirnikach turbogeneratorów dużej mocy z uwzględnieniem czynnika chłodzącego przy różnych systemach chłodzenia uzwojenia wzbudzenia. Praca doktorska, Gliwice 1999.
3. Krok R., Miksiewicz R.: Analiza pola temperatur w uzwojeniu wzbudzenia generatora synchronicznego z chłodzeniem bezpośrednim zabierakowym. Materiały Konferencyjne XXXI Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Maszyny Synchroniczne, Ustroń 1995.
4. Krok R., Miksiewicz R.: Analysis of the thermal field in excitation winding of a synchronous generator with direct radial-axial cooling system made on the basis of a thermal resistance network. ICEM'96, 10-12 September 1996, Vigo, Spain.
5. Krok R., Miksiewicz R.: Modeling of the thermal field in excitation windings of a turbogenerators on basis of resistance networks. ELECT'96, 17-19 September 1996 Saint-Nazaire, France.
6. Krok R., Miksiewicz R.: Pakiet programów komputerowych do analizy pól temperatury w wirnikach turbogeneratorów chłodzonych powietrzem oraz wodorem. Energetyka nr 2, luty 1997.
7. Latek W.: Turbogeneratory. WNT, Warszawa 1973.
8. Praca zbiorowa pod redakcją J. Szarguta: Modelowanie numeryczne pól temperatury. WNT, Warszawa 1992.
9. Titow B.B., Hutoreckij G.M., Zagorodnaja G.A., Wartanjan G.P., Zaslawskij D.I., Smotrow I.A.: Turbogeneratory - Rasczet i konstrukcja. Energija, Leningradskoje Otdjelenije, 1967.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Roman NADOLSKI

Abstract

The paper presents the thermal model and exemplary calculation of turbogenerator rotor with axial multistream ventilation system (Fig.1). The thermal model and equivalent diagram (Fig.3) have been worked out basing on the method of finite differences using interpretation of the system of difference equations of the heat conduction in the form of the thermal-electrical network. The division numbers of winding bars and ventilation ducts in particular zones have been selected in an experimental way. The thermal electrical network used for calculations has 2000 nodes. The system of equations describing the whole network is given by (3).

The calculation results have been obtained using the developed computer programs. These program can also be adapted to monitoring on line the temperature distribution in a rotor during turbogenerator operation.

The distributions of the temperature rises in winding bars (continuous line) and in hydrogen flowing in axial ducts for multistream ventilation system one step subslot duct is shown in Fig.5. Moreover, there are presented the design and calculations of the axial system for the 200 MW turbogenerator rotor, in which the additional ventilation zone in the winding slot part has been introduced (Fig.6).

Comparison of the temperature calculation results in the 200 MW turbogenerator rotors for different ventilation systems is presented in Tab.1. From the above comparison one can draw a conclusion that the direct diagonal system (Fig.4) is more efficient than the axial system with one step subslot duct (Fig.5) when considering the temperature distributions. The direct diagonal system of rotor ventilation ensures both the lower a maximum temperature rise in the excitation winding and the smaller non-uniformity of the temperature distribution.

It has been stated that introduction of the additional ventilation zone into the winding slot part improves the cooling efficiency in case of the axial ventilation system. The temperature rises are lower and the non-uniformity of the temperature distribution is smaller (Fig.7) in the excitation winding in comparison with the same quantities for the direct diagonal system.