

Jan KAPINOS, Roman KROK
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

MODEL OBLICZENIOWO-POMIAROWY DO OCENY ZAGROZEŃ TERMICZNYCH W UZWOJENIU STOJANA GENERATORA SYNCHRONICZNEGO PRZY ZAKŁÓCENIACH W UKŁADZIE CHŁODZENIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono model cieplny do obliczeń rozkładu temperatury w chłodzonym pośrednio uzwojeniu stojana generatora synchronicznego. Model ten opracowano w oparciu o metodę sieci cieplno-elektrycznych. Sporządzony na bazie modelu cieplnego program komputerowy umożliwia obliczenia rozkładów temperatury w prętach uzwojenia stojana generatora przy poprawnym działaniu układu chłodzenia oraz w warunkach wystąpienia zakłóceń w jego pracy. Zamieszczono przykładowe wyniki cieplnych badań symulacyjnych wraz z weryfikacją pomiarową dla generatora o mocy 70 MW.

A COMPUTATIONAL-MEASUREMENT MODEL FOR EVALUATION OF THERMAL STATES OF EMERGENCY IN SYNCHRONOUS GENERATOR STATOR WINDING AT DISTURBANCES IN COOLING SYSTEM

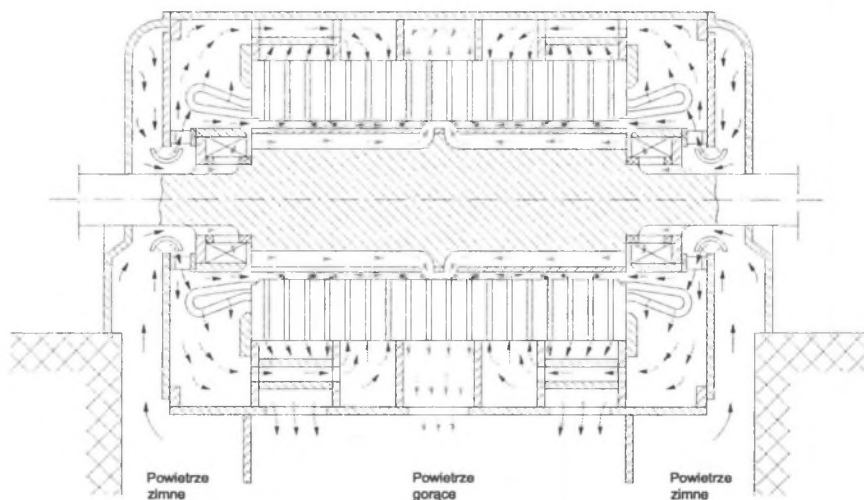
Summary. The paper presents a thermal model for calculations of temperature in an indirectly cooled synchronous generator stator winding. This model has been worked out basing on the method of thermal-electrical networks. A computer program developed on a basing of this model enables calculations of temperature distributions in winding bars of the generator stator at correct operation of the cooling system as well as at the presence of disturbances in its operation. Exemplary results of thermal simulations and verification by measurements for a 70 MW generator are given in the paper.

1. WSTĘP

Generatory synchroniczne chłodzone powietrzem budowane są obecnie na moce znamionowe przekraczające 300 MV-A. Układ powietrznego chłodzenia generatora może mieć rozwiązanie typu zamkniętego z wodnymi chłodnicami powietrza bądź typu otwartego wykorzystując powietrze pobierane z otoczenia poprzez filtr wlotowy. W przypadku generatorów synchronicznych napędzanych turbiną parową lub gazową najczęściej stosowany jest zamknięty układ chłodzenia, przy czym wodne chłodnice powietrza zabudowane są z reguły w fundamencie. W generatorze synchronicznym chłodzonym powietrzem układ chłodzenia ma zwykle dwa symetryczne obwody, w których obieg powietrza wymuszany jest przez dwa osiowe wentylatory umieszczone na końcach odkuwki wirnika. Przedmiotem analizy jest generator synchroniczny z powietrznym układem chłodzenia z dwustronną

trójstrugową wentylacją, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Generator synchroniczny ma bezpośrednie chłodzenie uzwojenia wzbudzenia i pośrednie chłodzenie uzwojenia stojana. Zimne powietrze z chłodnicy wodnej umieszczonej pod generatorem jest wprowadzane z dołu do komór utworzonych po obu stronach maszyny przez osłony zewnętrzne. Stąd przepływa do przestrzeni pomiędzy wałem i łopatkami wentylatorów odśrodkowych. Powietrze dzieli się w tej przestrzeni na dwie strugi. Jedna z tych strug powietrza przepływa kanałami wyfrezowanymi w wale wirnika, wpływa pod kołpaki, gdzie chłodzi połączenia czołowe uzwojeń wirnika, a następnie wlatuje do kanałów aksjalnych w prętach uzwojenia wzbudzenia. Z kanałów aksjalnych w prętach uzwojenia wzbudzenia struga powietrza wypływa do szczeliny stojan-wirnik radialnymi otworami wylotowymi znajdującymi się w odśrodkowej części wirnika. Druga z wymienionych strug powietrza przechodzi przez łopatki wentylatora. Struga ta płynie pod wpływem ciśnienia wytworzonego przez wentylator i za wentylatorem rozdziela się na dwie strugi. Jedna z tych strug powietrza wpływa do szczeliny stojan-wirnik, a druga przepływa przez przeloty znajdujące się w czołach uzwojenia stojana (chłodząc przy tym czoła uzwojenia), wlatuje do komory połączeń czołowych, a następnie do przestrzeni pomiędzy pakietem blach stojana i korpusem generatora.

System wentylacji generatora jest symetryczny względem płaszczyzny przechodzącej prostopadle do osi wału w połowie długości maszyny. Segmenty pakietu blach stojana w każdej z połówek maszyny chłodzone są trzema równoległymi strugami powietrza i stąd pochodzi nazwa tego systemu wentylacyjnego – „system trójstrugowy”. Pierwsza z tych strug powietrza płynie w kierunku od szczeliny stojan-wirnik w stronę zewnętrznego korpusu. Druga struga powietrza w rdzeniu stojana płynie w kierunku od korpusu do szczeliny stojan-wirnik, zaś trzecia struga (w odśrodkowej części rdzenia) płynie, podobnie jak pierwsza, w kierunku od szczeliny stojan-wirnik do korpusu zewnętrznego generatora. Dopływ powietrza z zewnętrznej komory, znajdującej się pomiędzy pakietem blach stojana i korpusem, do odpowiednich stref wentylacyjnych w rdzeniu stojana zapewniony jest dzięki odpowiednim prowadnicom. Gorące powietrze wypływa z generatora do chłodnicy wodnej znajdującej się pod maszyną otworem wylotowym umieszczonym w dolnej ośrodkowej części korpusu.



Rys. 1. Schemat dwustronnej trójstrugowej wentylacji powietrznej generatora
Fig. 1. Two-sided, three-stream air ventilation of a generator

Podczas eksploatacji generatorów o chłodzeniu powietrznym częste są przypadki występowania różnorodnych zakłóceń w ich układzie chłodzenia. Typowym zakłóceniem w układzie chłodzenia, który może wystąpić w trakcie eksploatacji generatora, jest obniżenie wydajności wodnej chłodnicy powietrza (np. wskutek uszkodzenia jednej z sekcji chłodnicy). Prowadzi to do podwyższenia temperatury zimnego powietrza chłodzącego na wlocie po jednej ze stron generatora i w konsekwencji eksploatacja odbywa się przy różnych temperaturach zimnego powietrza na wlotach po obu stronach generatora. Stwarza to dodatkowe narażenia termiczne dla izolacji uzwojeń generatora, obniżając żywotność jego układu izolacyjnego, a nawet może prowadzić do wystąpienia awarii. Interesującym zatem zagadnieniem jest określenie wpływu różnicy temperatur zimnego powietrza wlotowego po obu stronach generatora na rozkład temperatury wzdłuż długości prętów uzwojeń stojana i wartości średnich przyrostów temperatury uzwojeń generatora.

W artykule przedstawiono opracowany model cieplny stojana generatora synchronicznego o powietrznym układzie chłodzenia pozwalający na obliczenia rozkładu temperatury wzdłuż czoł prętów uzwojenia stojana w stanie pracy normalnej i zakłóceniu układu chłodzenia. W modelu cieplnym przyjęto, że temperatura rdzenia stojana jest jednakowa na całej jego długości, a jej wartość jest określona na podstawie przeprowadzonych pomiarów cieplnych generatora. W oparciu o opracowany model cieplny stojana generatora wykonano obliczenia dla generatora synchronicznego chłodzonego powietrzem o mocy znamionowej 70 MW.

2. MODEL CIEPLNY I METODA OBLICZEŃ POLA TEMPERATURY W UZWOJENIA STOJANA

Model cieplny uzwojenia stojana turbogeneratora opracowano [1+4] w oparciu o metodę sieci ciepłno-elektrycznych. Prętom uzwojenia stojana podzielonym wzdłuż długości na odcinki o długości Δx przyporządkowano sieć ciepłno-elektryczną odwzorowującą zjawiska wymiany ciepła zachodzące pomiędzy wydzielonymi obszarami. Każdemu obszarowi odpowiada na schemacie (rys. 2) jeden węzeł cieplny. Temperatura w węźle jest równa średniej temperaturze odpowiadającego mu obszaru pręta uzwojenia.

W sporządzonym modelu cieplnym uzwojenia stojana uwzględniono przepływy ciepła:

- wzdłuż prętów uzwojenia,
- z prętów uzwojenia w części żłobkowej do rdzenia stojana,
- z powierzchni prętów uzwojenia w części czołowej do powietrza chłodzącego.

W opracowanym modelu cieplnym uzwojenia stojana generatora założono:

- jednakową temperaturę rdzenia stojana na całej jego długości,
- jednakową temperaturę powietrza chłodzącego w otoczeniu wydzielonych obszarów w części czołowej uzwojenia stojana.

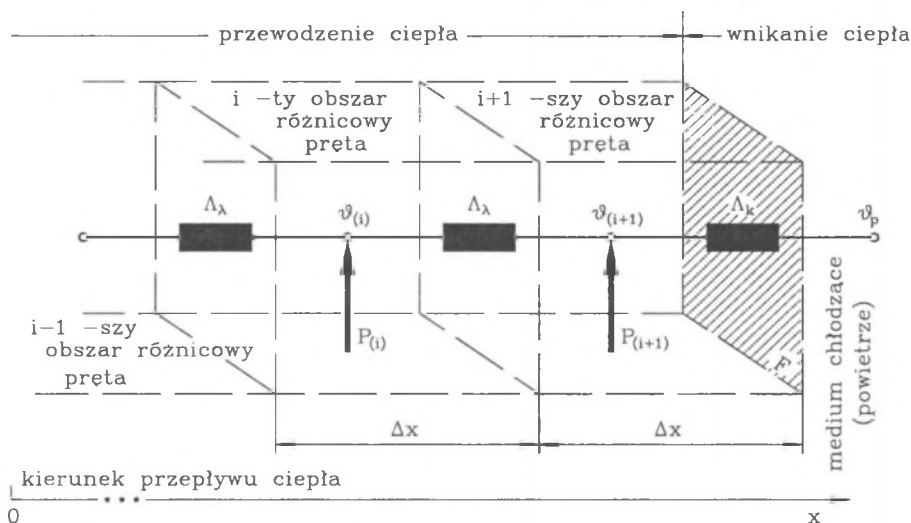
Przy obliczaniu strat występujących w obszarach prętów uwzględniono zarówno straty dodatkowe wywołane zjawiskiem wypierania prądu w przewodach elementarnych, jak i zależność strat od temperatury. Opracowując model cieplny założono, że przewodności cieplne właściwe materiałów, z których wykonane są elementy uzwojenia oraz współczynniki wnikania ciepła z powierzchni czoł uzwojenia do chłodzącego je powietrza, są stałe.

Na rys. 2 przedstawiono przykładowy podział fragmentu prętów uzwojenia stojana na wydzielone obszary wraz z przyporządkowaną mu siecią ciepłno-elektryczną.

Przewodności cieplne drogi dla strumienia ciepła przepływającego poprzez przewodzenie pomiędzy sąsiednimi obszarami (rys. 2) wyznaczono z zależności:

$$A_{\lambda} = \frac{\lambda F}{\Delta x}, \quad (1)$$

gdzie:
 λ - przewodność cieplna właściwa materiału wewnątrz wydzielonego obszaru,
 Δx - długość (w kierunku przepływu ciepła) wydzielonego obszaru,
 F - pole powierzchni ścianki oddzielającej sąsiednie wydzielone obszary.



Rys. 2. Fragment prętów uzwojenia stojana z podziałem na obszary wraz z przyporządkowaną mu siecią ciepłno-elektryczną

Fig. 2. Fragment of stator winding bars with division into elements together with the corresponding thermal-electrical network

Przewodności cieplne drogi dla strumienia ciepła przepływającego poprzez wnikanie ciepła ze ścianki wydzielonego obszaru (rys. 2) do medium chłodzącego wyznaczono z zależności:

$$A_k = k F, \quad (2)$$

gdzie:
 k - współczynnik wnikanie ciepła z powierzchni ścianki wydzielonego obszaru do medium chłodzącego,
 F - pole powierzchni ścianki wydzielonego obszaru, z której ciepło wnika do medium chłodzącego.

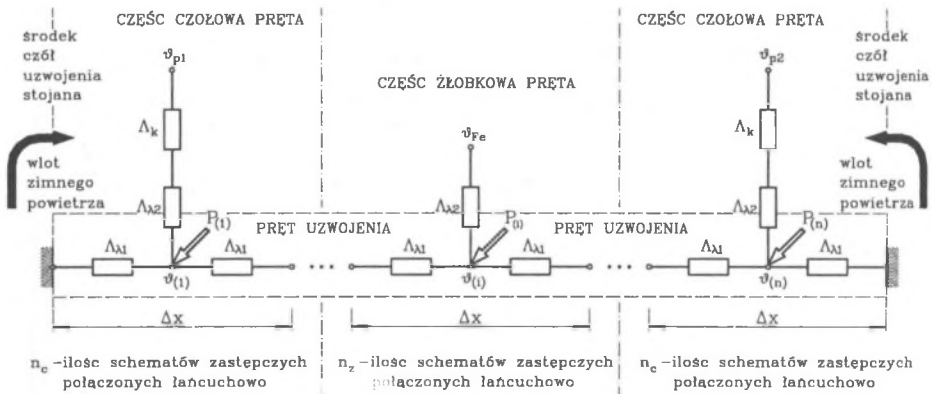
W wydzielonych obszarach prętów uzwojenia stojana (rys. 2) występują zależne od temperatury straty, które wyznaczono z zależności:

$$P_{(i)} = P_0 (1 + \alpha \vartheta_{(i)}), \quad P_0 = k_F j^2 \rho_0 V, \quad (3)$$

gdzie:
 P_0 - straty w wydzielonych obszarach prętów w temperaturze 0°C ,
 α - temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji materiału,
 $\vartheta_{(i)}$ - średnia temperatura i-tego obszaru pręta,

- j - średnia gęstość prądu płynącego w podzielonych na wydzielone obszary prętach,
- ρ_0 - rezystywność materiału w temperaturze 0°C ,
- k_F - współczynnik Fielda [5] uwzględniający straty dodatkowe wywołane zjawiskiem wypierania prądu w przewodach elementarnych prętów,
- V - objętość wydzielonego obszaru.

Model cieplny uzwojenia stojana (rys. 3) otrzymano w wyniku połączenia węzłów schematu przewodnościami cieplnymi związanymi z wymianą ciepła pomiędzy sąsiednimi obszarami na drodze przewodzenia lub wnikania ciepła.



Rys. 3. Zastępczy schemat cieplny uzwojenia stojana turbogenerатора ($n_c=67$; $n_z=294$; $\Delta x=0,01$ m)
 Fig. 3. Equivalent thermal diagram of a generator stator winding ($n_c=67$; $n_z=294$; $\Delta x=0,01$ m)

Wielkości wprowadzone na rys. 3 oznaczają odpowiednio:

- $\vartheta_{(1)} \dots \vartheta_{(i)} \dots \vartheta_{(n)}$ - średnie temperatury wydzielonych obszarów prętów uzwojenia stojana,
- $P_{(1)} \dots P_{(i)} \dots P_{(n)}$ - straty w wydzielonych obszarach prętów uzwojenia,
- $\vartheta_{p1}, \vartheta_{p2}$ - temperatury powietrza wlotowego chłodzącego czoła uzwojenia stojana,
- ϑ_{Fe} - temperatura rdzenia stojana,
- $\Lambda_{\lambda 1}$ - przewodności cieplne związane z przewodzeniem ciepła wzdłuż prętów,
- $\Lambda_{\lambda 2}$ - przewodności cieplne związane z przewodzeniem ciepła przez warstwę izolacji głównej prętów,
- Λ_k - przewodności cieplne związane z wnikaniem ciepła z powierzchni zewnętrznych czoł uzwojenia do medium chłodzącego.

Pole temperatury w prętach uzwojenia stojana generatora opisuje układ równań algebraicznych. Układ ten powstał w wyniku zastosowania metody potencjałów węzłowych (tutaj temperatur węzłowych) do rozwiązania zastępczego schematu cieplnego (rys. 3) i ma postać:

$$A \vec{\vartheta} = \vec{P}, \tag{4}$$

gdzie:

- A - macierz przewodności cieplnych,
- $\vec{\vartheta}$ - wektor temperatur węzłowych,
- \vec{P} - wektor wymuszeń cieplnych.

Model cieplny, w którym uwzględniono przepływ ciepła w kierunku poosiowym, umożliwia badania symulacyjne rozkładu temperatury w uzwojeniu stojana zarówno przy poprawnym, symetrycznym chłodzeniu po obu stronach generatora (*przy jednakowych temperaturach zimnego powietrza chłodzącego na wlotach po obu stronach generatora*), jak i dla warunków asymetrycznego chłodzenia, które ma miejsce w przypadku wystąpienia zakłóceń w obiegu powietrza chłodzącego.

Wykonując obliczenia cieplne uzwojenia stojana generatora przyjęto założenie upraszczające polegające na tym, że temperatura rdzenia stojana jest równa temperaturze zmierzonej przez czujniki umieszczone w żłobkach pomiędzy prętami uzwojenia. Czujniki te mierzą temperaturę izolacji umieszczonej pomiędzy prętami uzwojenia stojana generatora. Temperatura zmierzona za pomocą tych czujników jest więc, ściśle biorąc, niższa od temperatury przewodów elementarnych, lecz wyższa od temperatury rdzenia. Takie założenie przyjęte w obliczeniach powoduje zatem zwiększenie obliczonej temperatury przewodów elementarnych względem temperatur występujących w obiekcie rzeczywistym.

W konsekwencji temperatury obliczone w wyżej przedstawiony sposób są z tego powodu wyższe od wartości temperatur rzeczywistych w uzwojeniu stojana generatora w określonych warunkach eksploatacyjnych. Otrzymuje się zatem przy takiej majoryzacji margines pewności, że rzeczywiste eksploatacyjne temperatury uzwojenia stojana generatora nie mogą być wyższe od obliczonych na podstawie przyjętego modelu.

Do opracowania modelu cieplnego uzwojenia stojana wykorzystano następujące dane konstrukcyjne generatora o mocy 70 MW z chłodzeniem powietrznym:

- liczbę gałęzi równoległych w uzwojeniu stojana,
- wymiary i liczbę przewodów elementarnych wchodzących w skład prętów uzwojenia stojana,
- grubość izolacji żłobkowej w stojanie,
- długość oraz wysięg czoł uzwojenia,
- rodzaj materiału, z którego wykonana jest izolacja prętów uzwojenia stojana.

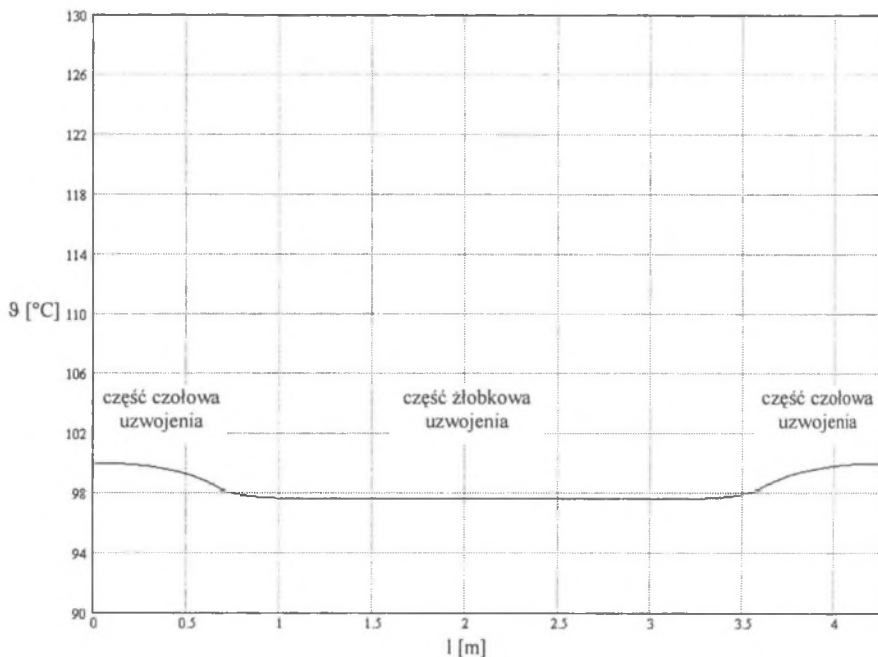
3. BADANIA SYMULACYJNE

Na podstawie sporządzonego modelu cieplnego obliczono rozkłady temperatury wzdłuż prętów uzwojenia stojana w wybranych stanach obciążenia generatora o mocy 70 MW:

- a) znamionowy stan pracy generatora – znamionowy prąd obciążenia $I_N = 4811$ A, temperatura zimnego powietrza chłodzącego na wlotach po obu stronach generatora jednakowa i równa 40°C ,
- b) eksploatacyjny stan pracy generatora z awarią układu chłodzenia – prąd obciążenia $I = 4195$ A, temperatury zimnego powietrza chłodzącego na wlotach po obu stronach generatora różnią się znacznie i wynoszą odpowiednio 45°C i 80°C ,

Na rys. 4 przedstawiono rozkład temperatury w prętach uzwojenia stojana generatora przy obciążeniu znamionowym generatora. Maksymalna temperatura w tym stanie pracy występuje w części czołowej uzwojenia i wynosi 100°C , a temperatura uzwojenia w części żłobkowej wynosi $97,5^\circ\text{C}$. Różnica pomiędzy temperaturami najzimniejszego i najcieplejszego punktu w prętach uzwojenia stojana wynosi $2,5^\circ\text{C}$. Różnica pomiędzy temperaturami w żłobkowej i czołowej części prętów uzwojenia stojana jest spowodowana różnymi warunkami odprowadzania ciepła z obu części uzwojenia. W części żłobkowej uzwojenia stojana ciepło generowane w prętach jest odprowadzane drogą przewodzenia do rdzenia poprzez warstwę izolacji żłobkowej. W części czołowej ciepło jest odprowadzane z prętów uzwojenia stojana do powietrza chłodzącego o temperaturze 40°C poprzez dwa opory cieplne (jeden związany ze

zjawiskiem przewodzenia ciepła przez warstwę izolacji, a drugi ze zjawiskiem wnikania ciepła drogą konwekcji z powierzchni prętów do powietrza chłodzącego). Uzyskany z obliczeń rozkład temperatury w uzwojeniu stojana generatora jest typowy dla takiego rozwiązania układu chłodzenia stojana. Średni przyrost temperatury uzwojenia stojana generatora o mocy 70 MW w znamionowym stanie pracy wynosi 59,6°C.



Rys. 4. Rozkład temperatury w prętach uzwojenia stojana w znamionowym stanie pracy generatora ($I_N = 4811$ A, $\vartheta_{Fe} = 85$ °C; temperatury zimnego powietrza chłodzącego na wlotach do generatora: $\vartheta_{p1} = 40$ °C, $\vartheta_{p2} = 40$ °C)

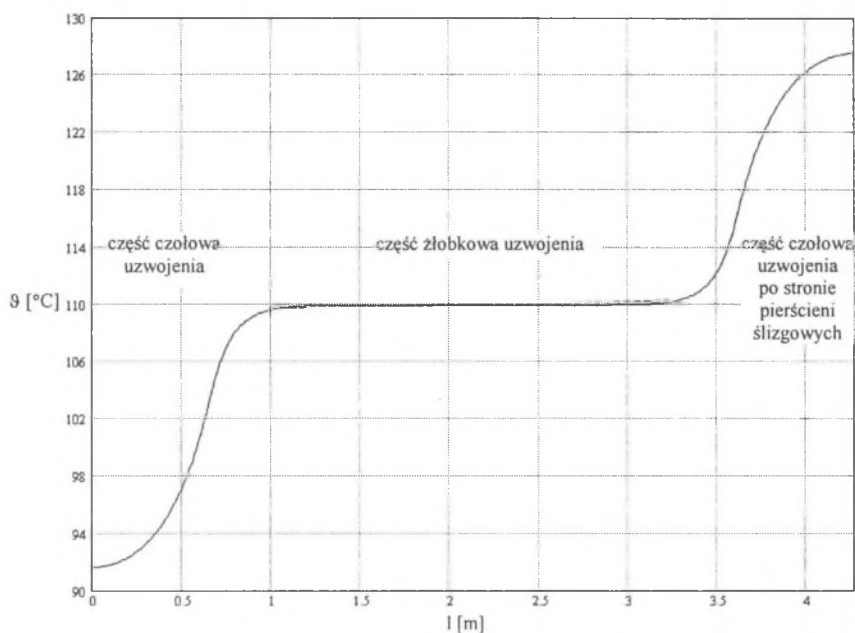
Fig. 4. Temperature distribution in stator winding bars at a the rated operating conditions of a generator ($I_N = 4811$ A, $\vartheta_{Fe} = 85$ °C; temperatures of cold air cooling at the generator inlets: $\vartheta_{p1} = 40$ °C, $\vartheta_{p2} = 40$ °C)

Na rys. 5 przedstawiono rozkład temperatury w prętach uzwojenia stojana generatora w warunkach wystąpienia zakłócenia w pracy układu chłodzenia, tj. przy podwyższonej temperaturze zimnego powietrza chłodzącego po jednej ze stron na wlocie do generatora (np. w następstwie uszkodzenia jednej z sekcji chłodnicy).

Przyjęto, że uzwojenie stojana generatora jest obciążone prądem $I = 4195$ A (87,2 % prądu znamionowego), a temperatury zimnego powietrza chłodzącego na wlotach po obu stronach generatora wynoszą odpowiednio 45°C i 80°C. W tym stanie pracy generatora maksymalna temperatura 128°C występuje w środkowej części czoł uzwojenia po stronie wlotu powietrza chłodzącego o temperaturze 80°C. Temperatura rdzenia stojana zwiększyła się wskutek stanu awaryjnego układu chłodzenia powodującego wzrost temperatury zimnego powietrza chłodzącego na wlocie do generatora po jednej ze stron.

W konsekwencji wzrostu temperatury po jednej ze stron generatora temperatura prętów uzwojenia stojana generatora w części żłobkowej jest o 12,5°C wyższa w warunkach obciążenia znamionowego generatora. Wzrost temperatury zimnego powietrza chłodzącego

do 80 °C na wlocie do generatora po jednej ze stron spowodował podwyższenie maksymalnej temperatury czół uzwojenia stojana znajdujących się po tej stronie do 128 °C.



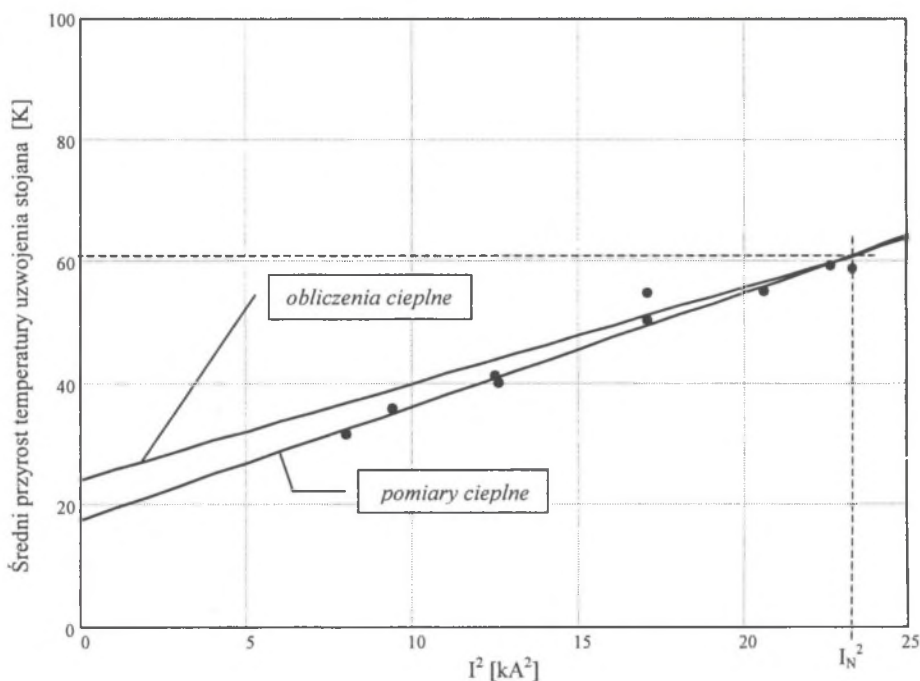
Rys. 5. Rozkład temperatury w prętach uzwojenia stojana generatora przy wystąpieniu zakłócenia w układzie chłodzenia ($I = 4195 \text{ A}$, $\vartheta_{Fe} = 100^\circ\text{C}$; temperatury zimnego powietrza chłodzącego na wlotach do generatora: $\vartheta_{p1} = 45^\circ\text{C}$, $\vartheta_{p2} = 80^\circ\text{C}$)

Fig. 5. Temperature distribution in stator winding bars at presence of disturbances in a cooling system ($I = 4195 \text{ A}$, $\vartheta_{Fe} = 100^\circ\text{C}$; temperatures of cold air cooling at the generator inlets: $\vartheta_{p1} = 45^\circ\text{C}$, $\vartheta_{p2} = 80^\circ\text{C}$)

Weryfikację otrzymanych z pomocą opracowanego modelu matematycznego wyników obliczeń cieplnych uzwojenia stojana generatora o mocy 70 MW przeprowadzono za pomocą powszechnie stosowanej metody pomiaru przyrostu temperatury uzwojenia stojana generatora w funkcji kwadratu prądu stojana. Straty mocy czynnej w uzwojeniu stojana generatora decydujące o stanie cieplnym uzwojenia stojana są sumą strat podstawowych i strat dodatkowych (wynikające z nierównomiernego rozkładu gęstości prądu w przewodach elementarnych prętów uzwojenia). Straty podstawowe w uzwojeniu stojana rosną ze wzrostem temperatury, natomiast straty dodatkowe maleją. Stąd z dobrym przybliżeniem można pominąć zmienność rezystancji uzwojenia stojana generatora przy wyznaczeniu zależności średniego przyrostu temperatury uzwojenia stojana w funkcji kwadratu prądu stojana.

Na rys. 6 przedstawiono opracowane wykresy średnich przyrostów temperatury uzwojenia stojana generatora (różnica pomiędzy średnią temperaturą uzwojenia stojana a temperaturą zimnego powietrza na wlocie do generatora) w funkcji kwadratu prądu stojana otrzymane na podstawie obliczeń cieplnych wykonanych z pomocą opracowanego modelu cieplnego stojana i na podstawie zmierzonych temperatur podczas eksploatacji generatora o mocy 70 MW, przy prawidłowej pracy układu chłodzenia. Uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników

obliczeniowych średnich przyrostów temperatury uzwojenia stojana generatora z wartościami temperatur zmierzonych w trakcie eksploatacji.



Rys. 6. Średni przyrost temperatury uzwojenia stojana generatora o mocy 70 MW w funkcji kwadratu prądu stojana

Fig. 6. Average rise in temperature of 70 MW generator stator winding bars as a function of the second power of a stator current

4. PODSUMOWANIE

Opracowany model cieplny uzwojenia stojana generatora chłodzonego pośrednio umożliwia wykonanie badań cieplnych uzwojenia, w szczególności obliczenia rozkładu temperatury w czołach uzwojenia stojana przy poprawnej pracy układu chłodzenia, jak i w występujących podczas eksploatacji stanach zakłóceń w postaci różnych temperatur powietrza wlotowego po obu stronach generatora. Zadawalające wyniki weryfikacji pomiarowej wykonanych obliczeń cieplnych uzwojenia stojana generatora o mocy 70 MW potwierdzają możliwość zastosowania opracowanego programu komputerowego przy modernizacjach oraz przy prowadzeniu analiz awarii generatorów.

LITERATURA

1. Kapinos J., Krok R., Miksiewicz R.: Rozkład temperatur w przecie uzwojenia wzbudzenia generatora synchronicznego z chłodzeniem bezpośrednim. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 138, Gliwice 1994.
2. Kapinos J., Krok R., Miksiewicz R.: Rozkład temperatur w przecie uzwojenia twornika generatora synchronicznego z chłodzeniem bezpośrednim. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 138, Gliwice 1994.

3. Krok R., Miksiewicz R.: Thermal models of turbogenerator rotors for different cooling systems used in CAD. 9th International Conference and Exhibition on Power Electronics and Motion Control EPE-PEMC 2000, 5-7 September 2000, Kosice, Slovak Republic, p. 131-136.
4. Krok R., Miksiewicz R.: The program aided monitoring of temperature in turbogenerator rotor with direct diagonal system of ventilation. ICEM 2002, 25-28 August 2002, Brugge, Belgium.
5. Latek W.: Turbogeneratory. WNT, Warszawa 1973.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Eugeniusz Koziej

Wpłynęło do Redakcji dnia 17 maja 2004 r.

Abstract

The paper presents thermal model (Fig. 3) for calculations of temperature distributions in an indirectly cooled (Fig. 1) synchronous generator stator winding. The temperature field in the generator stator winding is described by the system of equations (4) obtained as a result of application of the method of node potentials (here: temperatures) to solving the thermal-electrical network representing heat exchange in the stator winding bars. A computer program for thermal investigation of the stator winding has been developed on a basis of the thermal model. It enables calculations of temperature distributions in generator stator winding bars at the correct operation of the cooling system (Fig. 4) as well as at the presence of disturbances in the cooling system (Fig. 5). The thermal model used for calculations has been verified by measurements (Fig. 6) for a 70 MW generator. The calculation results of the average temperature rises of the generator stator winding have been very close to the values of the operating temperatures. It proves that the developed program is useful for thermal calculations of a generator stator with an indirect cooling system, and especially for analysis of problems connected with using a generator at the presence of disturbances in its cooling system.