

Antoni JOHN
Katedra Mechaniki Technicznej
Bogna MRÓWCZYŃSKA
Instytut Transportu
Politechnika Śląska

WYZNACZANIE ROZKŁADU TEMPERATUR W UZWOJENIU WIRNIKA TURBOGENERATORA METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono próbę wyznaczenia rozkładu temperatury w uzwojeniu wirnika turbogeneratora przy zastosowaniu metody elementów skończonych. Pręty uzwojenia zamodelowano jako przewody osiowo-symetryczne z kanałem wentylacyjnym w środku. Do rozwiązania przyjęto założenia upraszczające.

CALCULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN TURBOGENERATOR RUNNER APPLYING FINITE ELEMENT METHOD

Summary. Test of FEM application to appoint temperature distribution in turbogenerator runner. Conductor of winding is modelled as an axisymmetric bar with axisymmetric ventilating duct. Some simplifications of numerical model are prescribed.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ОБМОТКЕ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ИСПОЛЪЗУЯ МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Резюме. Здесь представлено применение метода конечных элементов для определения распределения температур в обмотке ротора турбогенератора. Токопровода обмотки моделированы осевосимметричными стержнями с осевосимметричными каналами.

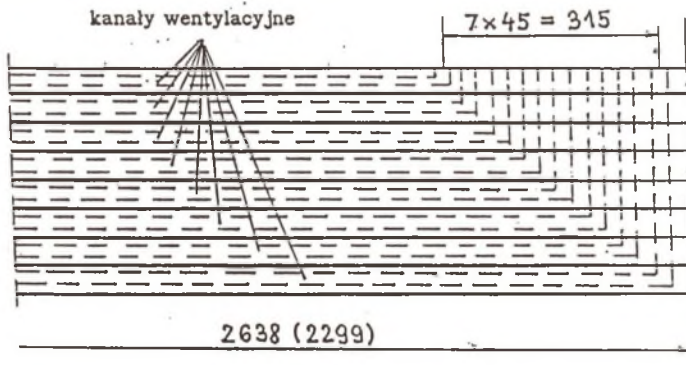
1. WSTĘP. ZAŁOŻENIA

Ze względu na wymagania eksploatacyjne potrzebna jest znajomość rozkładu temperatury w prętach uzwojenia wirnika i wartości maksymalnej temperatury występującej w uzwojeniu. Maksymalna temperatura nie może przekroczyć maksymalnej temperatury dopuszczalnej dla danej klasy izolacji. Na przykład dla klasy F - maksymalna temperatura wynosi 155 °C.

Do rozwiązania zagadnienia przyjęto model uproszczony. Zgodnie z zaleceniami literatury ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]) przyjęto następujące założenia:

- 1) Przewodność cieplna i współczynniki wnikania ciepła nie zależą od temperatury.
- 2) Nie ma wymiany ciepła pomiędzy uzwojeniem a stalą beczki wirnika.
- 3) Nie ma wymiany ciepła pomiędzy danym prętem i sąsiednimi prętami uzwojenia.
- 4) Zjawiska cieplne są powtarzalne w podziałce żłobkowej wirnika.
- 5) Rozkłady temperatur wzdłuż długości wirnika w poszczególnych prętach leżących w żłobkach są podobne.
- 6) Straty jednostkowe w rozpatrywanych elementach są stałe i równe średnim stratom w tych elementach.
- 7) Brak przyrostu temperatury w pionowych kanałach wentylacyjnych w strefie wylotowej.

Schemat systemu wentylacyjnego (rozkład kanałów osiowych w strefie żłobkowej) turbogeneratora TWW-200-2 po modernizacji przedstawia rys.1.



Rys.1. Schemat systemu wentylacyjnego

Fig.1. Scheme of ventilating system

Dolny pręt w żłobku posiada najdłuższy kanał osiowy, którym przepływa chłodzący uzwojenie wodór, dlatego też temperatura wodoru na wylocie z tego pręta będzie najwyższa.

W górnym pręcie sytuacja wygląda inaczej. Odcinek kanału osiowego jest krótszy (o $7 \times 45 = 315$ [mm]), natomiast chłodzenie na pozostałym odcinku (315 mm) odbywa się poprzez pionowe kanały wentylacyjne, którymi odpływa wodór z prętów położonych poniżej - w kierunku dna żłobka. Temperatura wodoru w tych kanałach wzrasta proporcjonalnie do przyrostu długości strefy chłodzenia w poszczególnych prętach leżących poniżej (w kierunku dna żłobka). Odcinki kanałów osiowych w strefach pomiędzy pionowymi kanałami wylotowymi (w prętach od 1 do 7 - licząc od góry) wypełnione są miedzią, przez co zwiększa się przekrój przewodnika, a tym samym zmniejszają się straty jednostkowe (moc wydzielana w jednostce objętości przewodnika) o ok. 32%, co w istotny sposób zmniejsza nagrzewanie pręta.

2. METODA ROZWIĄZANIA ZAGADNIENIA. MODEL NUMERYCZNY

W celu rozwiązania zagadnienia zbudowano program numeryczny oparty na metodzie elementów skończonych. Program rozwiązuje równanie przewodnictwa cieplnego (równanie Fouriera)

$$\lambda \nabla^2 \theta = c \rho \partial \theta / \partial \tau ,$$

gdzie: θ - temperatura,

λ - współczynnik przewodzenia,

c - ciepło właściwe,

τ - czas,

ρ - gęstość substancji,

z uwzględnieniem takich warunków brzegowych jak: wnikanie ciepła

$$\dot{Q} = A \alpha (t - \theta) \tau ,$$

gdzie: α - współczynnik wnikania ciepła,

$(t - \theta)$ - różnica temperatur,

$\dot{Q} = - \lambda A \partial \theta / \partial n$ - strumień ciepła przez powierzchnię A ,

dopływ mocy w węźle (przez węzeł rozumie się tutaj węzeł elementu skończonego, na które to elementy jest podzielony rozpatrywany obszar).

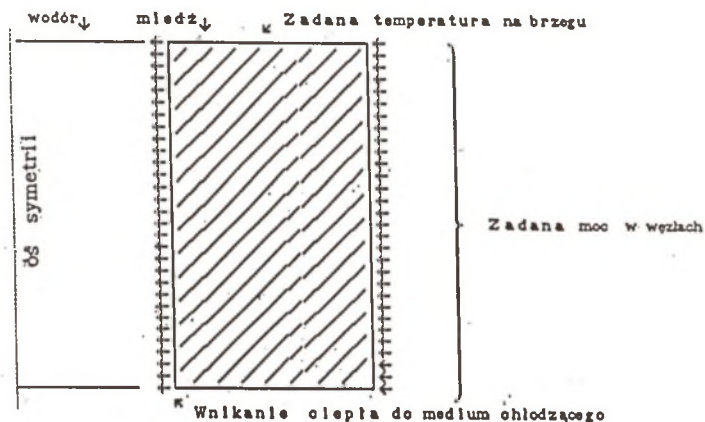
Ze względu na symetrię układu chłodzenia w rozważaniach uwzględniono tylko połowę wirnika, a tym samym połowę pręta (cewki). Zadanie rozwiązano przyjmując model pręta w postaci przewodu osiowo-symetrycznego, mającego taką samą objętość - pole przekroju czynnego ze względu na wydzielaną moc oraz taką samą powierzchnię kanału wewnętrznego (osiowego) ze względu na wymianę ciepła pomiędzy miedzią i medium chłodzącym.

Schemat obciążenia cieplnego pręta przedstawiono na rys. 2.

Uzyskane wyniki w istotny sposób zależą od współczynnika wnikania, zadanej mocy na węzeł, temperatury na brzegu oraz początkowej temperatury pręta.

Przyjęto temperaturę początkową wszystkich elementów pręta $T_0=40$ °C. Temperatury na jednym z końców pręta (od strony czołowej turbogeneratora) przyjęto wariantowo: $T_1=40$ °C, $T_2=75$ °C, $T_3=100$ °C, $T_4=125$ °C. Po czasie ok. 200-300 s ustala się równowaga cieplna w pręcie przy założeniach, że wodór odbiera ciepło zgodnie z zadaniem współczynnikiem wnikania oraz zachodzi przepływ ciepła w pręcie - funkcjonuje chłodzenie zewnętrzne w strefie czołowej.

Rozkład temperatur w medium chłodzącym rozwiązywany jest jako oddzielne zadanie. Kanał, w którym przepływa wodór, zamodelowano jako pręt osiowo-symetryczny o własnościach wodoru. Wymiary przyjęto tak, aby powierzchnia wymiany ciepła między prętem i medium była taka, jak w układzie rzeczywistym oraz żeby objętość medium była



Rys.2. Schemat obciążenia cieplnego pręta

Fig.2. Scheme of thermal load

taka sama. Przyjęto, że dopływ ciepła następuje przez zewnętrzną powierzchnię zgodnie z zadaniem współczynnikiem wnikania. Na jednym końcu zadano temperaturę otoczenia (np. 40 °C - tak, jak dla turbogeneratora przed modernizacją).

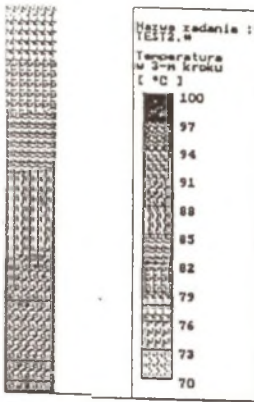
Temperatury w poszczególnych przekrojach wyznaczono biorąc pod uwagę czas, w którym medium przebędzie dany odcinek drogi, a tym samym pobierze odpowiednią ilość ciepła z pręta zgodnie z zadaniem współczynnikiem wnikania.

Rozkład temperatur w istotny sposób zależy od temperatury początkowej medium i współczynnika wnikania.

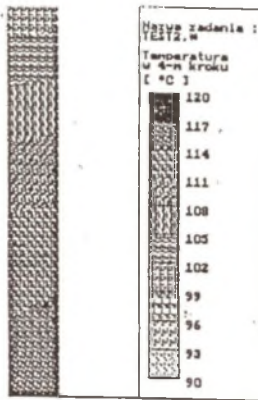
3. WYNIKI OBLICZEŃ

Wyniki przedstawiono w formie diagramów sporządzonych za pomocą specjalnego programu graficznego z wykorzystaniem drukarki igłowej.

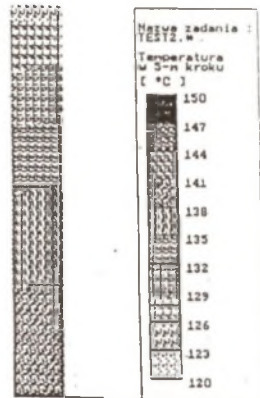
Rysunki 3-5 przedstawiają rozkład temperatur w pręcie z kanałem osiowym przy temperaturze brzegowej wynoszącej odpowiednio 75, 100 i 125 °C po czasie 1000 s. Na rysunkach 6-8 przedstawiono rozkład temperatur w medium chłodzącym przy temperaturze początkowej 10 °C i temperaturze brzegu 40 °C odpowiednio po czasie 0.04s, 0.08s i 0.1028s, co odpowiada odległości od strefy czołowej 1.026m, 2.052m oraz 2.638m, czyli gotowe długości najdłuższego pręta cewki w wirniku. Dane do obliczeń przyjęto na podstawie dostępnej literatury.



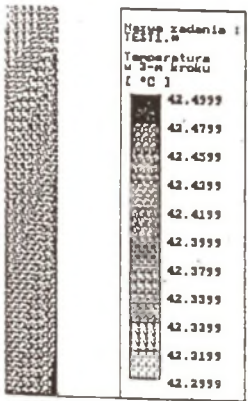
Rys.3, Fig.3



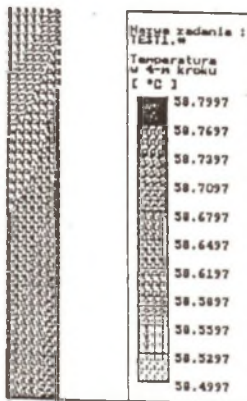
Rys.4, Fig.4



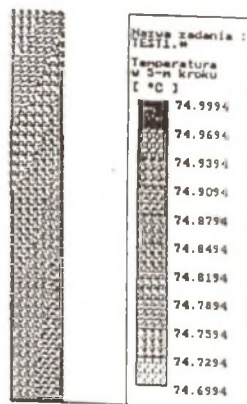
Rys.5, Fig.5



Rys.6, Fig.6



Rys.7, Fig.7



Rys.8, Fig.8

4. PODSUMOWANIE

Opracowana metoda obliczeń pozwala, na obecnym etapie, wyznaczać rozkład temperatury w uzwojeniu i medium chłodzącym przy uwzględnieniu warunków brzegowych. Można również uwzględnić własności izolacji.

Na podstawie otrzymanych wyników (nie tylko zamieszczonych w tekście) można zauważyć, że na rozkład temperatur w pręcie i medium w istotny sposób wpływa chłodzenie prętów w części czołowej, do której odpywa ciepło z odcinków prętów położonych w części środkowej wirnika. Przewyższenie temperatury w środku wirnika w stosunku do części czołowej zależy w sposób istotny od temperatury początkowej elementów i temperatury końców pręta w części czołowej i waha się w granicach od 4 do 25 °C. Podobnie przedstawiają się zależności dla medium chłodzącego. W tym przypadku jeszcze bardziej uwidacznia się wpływ temperatury początkowej i brzegowej na nagrzewanie ośrodka. Otrzymane wyniki znajdują potwierdzenie w badaniach doświadczalnych i danych zamieszczanych w literaturze.

Im większa prędkość medium (większa wydajność wentylatorów), tym mniejsze nagrzewanie wodoru w kanałach wentylacyjnych. Im większa powierzchnia kanału, tym lepsze odbieranie ciepła przez medium. Jeżeli wzrośnie przekrój przewodnika, to zmaleją straty mocy.

Optymalny dobór parametrów uzwojenia i układu wentylacyjnego jest niezbędny w przypadku projektowania i modernizacji turbogeneratorów.

LITERATURA

- [1] W.Łatek, J.Przybysz: Rozkład temperatur w uzwojeniu wirnika turbogeneratora z chłodzeniem bezpośrednim zabierakowym. Archiwum Elektrotechniki, Tom XVIII, Zeszyt 3, 1969, ss. 559-568.
- [2] J.Przybysz: Metoda wyznaczania rozkładu temperatur w uzwojeniu wirnika turbogeneratora. Archiwum Elektrotechniki Tom XXII, Zeszyt 4, 1973. ss. 767-777.
- [3] A.Bytnar, J.Przybysz: Pola temperatur turbogeneratora 500 MW. Przegląd Elektrotechniczny, R. LVI, z. 8-9/1980, s. 385-388.
- [4] J.Przybysz: Obciążalność turbogeneratorów chłodzonych wodorem. Przegląd Elektrotechniczny, R. LI, z. 2/1975, ss. 54-58.
- [5] W.W.Titow i drugije: Turbogeneratory. Rascziet i konstrukcija. Leningrad, Energija, 1967.
- [6] S.Ochędusko: Termodynamika stosowana. WNT, Warszawa 1964.

- [7] J.Szargut: Termodynamika. PWN, Warszawa 1975.
- [8] Modelowanie numeryczne pól temperatur - pod red. J.Szarguta. WNT, Warszawa 1992.
- [9] S.Wiśniewski: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1988.
- [10] Naprężenia cieplne - pod redakcją Z.Orłosa. PWN, Warszawa 1991.

Recenzent: Dr hab. inż. Andrzej Nowak

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1993 r.

Abstract

It is necessary to know temperature distribution in turbogenerator runner, because the highest temperature in winding conductors and electric insulation must be not higher than admissible temperature for given grade of electric insulation.

A scheme of ventilating system is shown in figure 1. Some simplifications are prescribed. Winding conductor is modelled as an axisymmetric bar with axisymmetric ventilating duct. A scheme of thermal load is presented in figure 2.

Given problem can be solved using finite element method. A numerical program solving Fourier and Newton equations for heat flow was built.

Temperature of cooling medium and conductor depends on time (distance between the beginning of the bar and given point), given thermal load, coefficient of penetration, thermal conductivity, initial and boundary temperature.

Some numerical results are obtained. Fig. 3-5 show the temperature distribution in conductor for given boundary temperatures 75, 100 and 125 °C respectively. Temperature distribution in cooling medium we can show in fig. 6-8 after 0.04s, 0.08s and 0.1028s respectively. That corresponding to distance from the beginning of the bar 1.026m, 2.052m and 2.638m respectively.

The numerical results agree with experimental and bibliography examples.