1994 Nr kol. 1245

### Jan KAPINOS, Roman KROK, Roman MIKSIEWICZ

# ROZKŁAD TEMPERATUR W PRĘCIE UZWOJENIA WZBUDZENIA GENERATORA SYNCHRONICZNEGO Z CHŁODZENIEM BEZPOŚREDNIM

<u>Streszczenie</u>. Przedstawiono sposób wyznaczania rozkładu temperatur w prętach uzwojenia wzbudzenia generatora synchronicznego z chłodzeniem bezpośrednim. Równania różniczkowe przewodnictwa ciepła dla pręta uzwojenia przekształcono do postaci równań różnicowych i otrzymano zastępczy schemat cieplny uzwojenia. Zamieszczono wyniki obliczeń rozkładu temperatur w uzwojeniu wzbudzenia generatora TWW-200-2.

# TEMPERATURE DISTRIBUTION IN BAR EXCITATION WINDING OF SYNCHRONOUS GENERATOR WITH DIRECT COOLING SYSTEM

<u>Summary</u>. The procedure of calculation of temperature distribution in bar exitation winding of synchronous generator with direct cooling system are presented. Differential equations of heat conduction for bar winding are transformed to difference equations and a mathematical thermal model of winding is obtained. The results of calculation temperature distribution in exitation winding of generators TWW-200-2 are presented.

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОВОДНИКЕ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

<u>Резюме</u>. Предложен метод расчета распределения температур в стержнях обмотки возбуждения синхронного генератора с непосредственным охлаждением. Дифференциальные уравнения тепловых проводимостей для температур стержня обмотки превращены в алгебраические уравнения. Получена тепловая схема замещения для стержня. Приведены результаты расчета распределения температур в обмотке возбуждения генератора TBB-200-2.

### 1. WSTĘP

Generatory synchroniczne dużej mocy są maszynami o bezpośrednim systemie chłodzenia uzwojeń wzbudzenia i twornika.

Jednym z rozwiązań bezpośredniego systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia generatora synchronicznego dużej mocy jest układ chłodzenia zabierakowy, stosowany w generatorach produkcji krajowej o mocy 200 MW. Układ ten pozwala na wielostrugowe chłodzenie uzwojenia wzbudzenia i działa na zasadzie samoczynnej wentylacji (rys.1).



Rys.1. Zabierakowy system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia generatora Fig.1. Cooling system of exitation winding of generator

Chłodzenie części <u>żłobkowej</u> uzwojenia wzbudzenia odbywa się za pomocą uformowanych odpowiednio skośnych kanałów, którymi przepływa medium chłodzące (wodór), omywając pręty uzwojenia wzbudzenia z dwóch stron (rys.2). Skośne kanały chłodzące na długości wirnika uzyskano poprzez odpowiednie wyfrezowanie prętów uzwojenia wzbudzenia na ich długości, wzajemnie w stosunku do siebie przesuniętych. Przez otwory wlotowe w klinach żłobkowych (zabieracze) medium chłodzące przedostaje się ze szczeliny pomiędzy stojanem a wirnikiem generatora do kanałów



Rys.2. Przekrój żłobka wirnika Fig.2. Cross-section of rotor slots

położonych po jednej stronie prętów uzwojenia wzbudzenia, a następnie po dnie żłobka wirnika przepływa do kanałów znajdujących się po drugiej stronie prętów, skąd przechodzi do szczeliny przez otwory wylotowe w klinach (deflektory). Wodór dopływa i odpływa w części żłobkowej strefami położonymi na przemian wzdłuż całej długości beczki wirnika (na rys.1 zaznaczono 3 strefy wlotowe i wylotowe).

W części <u>czołowej</u> uzwojenia wzbudzenia w każdym pręcie wykonane są po dwa kanały podłużne. Medium chłodzące dopływa przez kanały w wale wirnika pod kołpak, następnie przepływa przez kanały w częściach czołowych prętów, skąd wypływa otworami w klinach skrajnej strefy wirnika oraz kanałami w osi dużego zęba.

Znajomość rozkładu temperatur w częściach czynnych generatora podczas eksploatacji pozwala określić jego zakres obciążeń dopuszczalnych. Poza tym jest również przydatna przy dokonywaniu

zmian modernizacyjnych w generatorze, w szczególności w celu podwyższenia jego mocy znamionowej, dzięki zastosowaniu nowych materiałów izolacyjnych i usprawnieniu względnie zmianie systemu chłodzenia. Rozkład temperatur w uzwojeniach generatora można wyznaczyć metodą zastępczych schematów cieplnych lub metodą rozwiązywania układów równań różniczkowych przewodnictwa ciepła, opisujących rozkład temperatur w poszczególnych elementach generatora.

W artykule przedstawiono sposób wyznaczenia rozkładu temperatur w uzwojeniu wzbudzenia generatora z bezpośrednim zabierakowym systemem metodą schematów cieplnych.

# 2. MODEL MATEMATYCZNY

Dla przedstawionego systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia opracowano model matematyczny opisujący rozkład temperatur w prętach uzwojenia wzdłuż ich długości. Przy tworzeniu modelu matematycznego przyjęto następujące założenia upraszczające:

(1)

- medium wpływające do kanałów ze szczeliny ma we wszystkich strefach wlotu jednakową temperaturę,
- przewodność cieplna właściwa materiału uzwojenia i współczynnik wnikania ciepła nie zależą od temperatury,
- nie ma wymiany ciepła pomiędzy materiałem uzwojenia a odkuwką beczki wirnika,
- nie ma wymiany ciepła pomiędzy rozpatrywanym prętem a sąsiednimi prętami uzwojenia.

W celu określenia równań różniczkowych przewodnictwa ciepła podzielono pręt uzwojenia wzbudzenia na strefy, w których dane części pręta znajdują się w podobnych warunkach wentylacyjnych (rys.1). Z uwagi na symetrię cieplną wirnika rozważania ograniczono do określenia rozkładu temperatur w uzwojeniu wzbudzenia na połowie długości wirnika. W poszczególnych odcinkach pręta uzwojenia wzbudzenia rozkład temperatur jest opisany za pomocą równań różniczkowych [4]:

 w częściach czołowych pręta dla dwóch stref wentylacyjnych uzwojenia wzbudzenia:

$$\lambda S_{c} \frac{d^{2} \vartheta}{dx^{2}} + p_{c} S_{c} (1 + \beta \vartheta) - \alpha_{c1} l_{ol} (\vartheta - \vartheta_{w}) - \alpha_{c2} l_{o2} (\vartheta - \vartheta_{wc}) = 0,$$

$$(-1)^{k} c Q_{k} \frac{d \vartheta_{w}}{dx} - \alpha_{cl} l_{ol} (\vartheta - \vartheta_{w}) = 0,$$

gdzie:

k=1,2 - numer strefy wentylacyjnej,

 w częściach żłobkowych pręta dla trzech stref wentylacyjnych uzwojenia wzbudzenia:

$$\lambda S \frac{d^2 \vartheta}{dx^2} + p S(1 + \beta \vartheta) - \alpha l_o(\vartheta - \vartheta_{Rk}) = 0, \qquad (2)$$

gdzie:

k=1,2,3 - numer strefy wentylacyjnej,

przy czym:

θ<sub>w</sub>, θ<sub>wc</sub>, θ<sub>Rk</sub> - przyrosty temperatur medium chłodzącego (w obrębie czół, pod kołpakiem, w k-tej strefie wentylacyjnej w części żłobkowej),

9 - przyrost temperatury miedzi pręta,

- α, α<sub>c1</sub>, α<sub>c2</sub> współczynnik wnikania ciepła (w części żłobkowej, w częściach czołowych),
- $l_0, l_{01}, l_{02}$
- czołowych), - długości obwodu styku miedzi pręta z medium chłodzącym

(w części żłobkowej, w częściach czołowych),

- Qk wydatek medium chłodzącego w obrębie czół,
- p,p<sub>c</sub> jednostkowe straty mocy w części żłobkowej i czołowej pręta w temperaturze odniesienia,

S,S<sub>c</sub> - pole przekroju miedzi pręta w części żłobkowej i czołowej,

- c ciepło właściwe medium chłodzącego,
- β termiczny współczynnik rezystancji miedzi pręta,
- λ przewodność cieplna właściwa miedzi pręta.

Przyrosty temperatur określone są względem temperatury odniesienia (temperatura wodoru po wyjściu z chłodnicy).

Rozwiązując równania różniczkowe (1) i (2) należy uwzględnić odpowiednie warunki brzegowe, które wynikają:

- z braku przepływu ciepła (blokada ciepła) w pręcie uzwojenia wzbudzenia w środku połączeń czołowych oraz w środku beczki wirnika ze względu na symetrię układu wentylacji w obrębie 1/4 długości pręta,
- z równości temperatur oraz mocy cieplnych przepływających przez pręt uzwojenia na stykach dwóch obszarów wentylacji,
- z zadanej wartości temperatury medium chłodzącego na wlocie do osiowych kanałów chłodzących w czołach uzwojenia wzbudzenia.

Układy równań różniczkowych (1),(2) przekształca się do postaci równań różnicowych przez zastąpienie ilorazów różniczkowych ilorazami różnicowymi. Otrzymuje się następujące postacie równań różnicowych opisujących rozkład temperatury w danym pręcie uzwojenia wzbudzenia:

- w częściach czołowych pręta dla dwóch stref wentylacyjnych:

$$-\Lambda_{ck}(\vartheta_{(i)} - \vartheta_{(i-1)}) - \Lambda_{ck}(\vartheta_{(i)} - \vartheta_{(i+1)}) + P_{ck}^* - \Lambda_{Ak}(\vartheta_{(i)} - \vartheta_{w(i-1)}) - -\Lambda_{wk}(\vartheta_{(i)} - \vartheta_{wc}) = 0,$$
(3)

$$(-1)^{k}\Lambda_{gk}(\mathfrak{P}_{w(i)}-\mathfrak{P}_{w(i-1)})+(-1)^{k}\Lambda_{gk}(\mathfrak{P}_{w(i)}-\mathfrak{P}_{w(i+1)})-\Lambda_{Ak}(\mathfrak{P}_{w(i)}-\mathfrak{P}_{(i)})=0,$$

gdzie:

$$\Lambda_{ck} = \frac{\lambda S_c}{\Delta x_{ck}}, \qquad \qquad \Lambda_{gk} = \frac{c Q_k}{2}$$

$$\begin{split} \Lambda_{Ak} &= \alpha_{c1} l_{ol} \Delta x_{ck}, & \Lambda_{wk} &= \alpha_{c2} l_{o2} \Delta x_{ck}, \\ P_{ck} &= p_c \, S_c \, \Delta x_{ck}, & P^*_{ck} &= P_{ck} \big( 1 + \beta \, \vartheta_{(i)} \big), \\ \Delta x_{ck} &= \frac{l_{ck}}{n_{ck}}, \end{split}$$

n<sub>ck</sub> - liczba elementarnych odcinków w k-tej strefie wentylacji w części czołowej uzwojenia,

- w częściach żłobkowych pręta dla trzech stref wentylacji:

$$-\Lambda_{bk}(\vartheta_{(i)} - \vartheta_{(i-1)}) - \Lambda_{bk}(\vartheta_{(i)} - \vartheta_{(i+1)}) + P_{bk}^* - \Lambda_{Rk}(\vartheta_{(i)} - \vartheta_{Rk}) = 0, \qquad (4)$$

gdzie:

$$\begin{split} \Lambda_{bk} &= \frac{\lambda S_c}{\Delta x_{bk}}, & \Lambda_{Rk} &= \alpha l_o \Delta x_{bk}, \\ P_{bk} &= p S \Delta x_{bk}, & P_{bk}^* &= P_{bk} (1 + \beta \vartheta_{(i)}), \\ \Delta x_{bk} &= \frac{l_{bk}}{n_{bk}}, \end{split}$$

l<sub>bk</sub> - długość k-tej strefy wentylacji w części żłobkowej uzwojenia,

 n<sub>bk</sub> - liczba elementarnych odcinków w k-tej strefie wentylacji w części żłobkowej uzwojenia.

Poszczególnym równaniom różnicowym przyporządkowano elementarne moduły cieplne. Liczba elementarnych modułów cieplnych występująca w obrębie jednej strefy wentylacji jest równa zadanej liczbie przedziałów elementarnych, na które została podzielona rozpatrywana strefa. Zwiększenie liczby przedziałów elementarnych, pociągające za sobą zwiększenie liczby modułów połączonych w łańcuchy, powoduje zmniejszenie błędu obliczeniowego, wynikającego z dyskretyzacji równań różniczkowych.

Zastępczy schemat cieplny całego pręta uzwojenia wzbudzenia uzyskuje się w wyniku łańcuchowego połączenia elementarnych modułów cieplnych (rys.3). Poszczególne elementy zastępczego schematu cieplnego pręta mają interpretację fizykalną. Istnieje możliwość stosunkowo prostej rozbudowy schematu i rezygnacji z niektórych założeń upraszczających, przyjętych przy tworzeniu równań różniczkowych (1),(2). Otrzymany schemat pozwala wyznaczyć wybrane globalne wielkości cieplne, np. ilość ciepła przepływająca pomiędzy częścią żłobkową i czołowa uzwojenia, ilość ciepła oddanego do wodoru w poszczególnych strefach wentylacyjnych.

# 3. ALGORYTM OBLICZEŃ

Dla przedstawionego zastępczego schematu cieplnego pręta uzwojenia wzbudzenia (rys.3) utworzono układ równań algebraicznych, pozwalający wyznaczyć temperatury w węzłach schematu cieplnego, o postaci:

$$[A][\vartheta] = [B], \tag{5}$$

gdzie:

- [A] kwadratowa macierz przewodności cieplnych stopnia  $(2n_c + n_b)$ ,
- $[\vartheta]$  wektor temperatur węzłowych o wymiarze  $(2n_c + n_b)$ ,
- [B] wektor wymuszeń cieplnych o wymiarze  $(2n_c + n_b)$ ,
- $n_b$  sumaryczna liczba zadanych przedziałów elementarnych dla części żłobkowej pręta,
- n<sub>c</sub> sumaryczna liczba zadanych przedziałów elementarnych dla części czołowej pręta.

Elementy macierzy [A], [B] dla poszczególnych wierszy wynoszą:

- dla wiersza i=1:  $a_{1,1} = \beta P_{c1} - \Lambda_{c1} - \Lambda_{w1} - \Lambda_{A1}, \quad a_{1,2} = \Lambda_{c1}, \quad a_{1,n_c+n_b+1} = \Lambda_{A1},$  $b_1 = -P_{c1} - \Lambda_{w1} \vartheta_{wc},$ 

$$\begin{array}{l} - \mbox{dla wierszy } 2 \div n_c \\ k = 1 \quad \mbox{dla } i \in \langle 2, n_{cl} \rangle, \\ k = 2 \quad \mbox{dla } i \in \langle n_{cl} + 1, n_c \rangle, \\ a_{i,j-l} = \Lambda_{i-l,i}, \quad a_{i,i} = \beta P_{ck} - \Lambda_{i-l,i} - \Lambda_{i,j+l} - \Lambda_{wk} - \Lambda_{Ak}, \qquad a_{i,j+l} = \Lambda_{i,j+l}, \\ a_{i,n_c+n_b+i} = \Lambda_{Ak}, \\ b_i = -P_{ck} - \Lambda_{wl} \, \vartheta_{wc}, \end{array}$$

```
 \begin{array}{l} - \mbox{ dla wierszy } (n_c + l) \div (n_c + n_b - l); \\ & \left\{ \begin{matrix} k = 1 & \mbox{ dla } i \in \langle n_c + l, n_c + n_{bl} \rangle, \\ k = 2 & \mbox{ dla } i \in \langle n_c + n_{bl} + l, n_c + n_{bl} + n_{b2} \rangle, \\ k = 3 & \mbox{ dla } i \in \langle n_c + n_{bl} + n_{b2} + l, n_c + n_b - l \rangle, \\ a_{i,i-1} = \Lambda_{i-l,i}, & a_{i,i} = \beta P_{bk} - \Lambda_{i-l,i} - \Lambda_{i,i+1} - \Lambda_{Rk}, \quad a_{i,i+1} = \Lambda_{i,i+1}, \\ b_i = -P_{bk} - \Lambda_{Rk} \, \vartheta_{Rk}, \end{array} \right.
```

- dla wiersza 
$$\mathbf{i} = \mathbf{n}_c + \mathbf{n}_b$$
:  
 $\mathbf{a}_{i,i-1} = \Lambda_{i-1,i}, \quad \mathbf{a}_{i,i} = \beta P_{b3} - \Lambda_{i-1,i} - \Lambda_{R3},$   
 $\mathbf{b}_i = -P_{b3} - \Lambda_{R3} \vartheta_{R3},$ 

- dla wiersza i = 
$$n_c + n_b + 1$$
:  
 $a_{i,1} = \Lambda_{AI}, \quad a_{i,i} = -\Lambda_{gI} - \Lambda_{AI}, \quad a_{i,i+1} = \Lambda_{gI},$   
 $b_i = 0,$ 

```
 \begin{array}{ll} - \mbox{ dla wierszy } (n_c + n_b + 2) + (n_c + n_b + n_{c1} - 1): \\ a_{i,i-n_b-n_c} = \Lambda_{A1}, & a_{i,i-1} = -\Lambda_{g1}, & a_{i,i} = -\Lambda_{A1}, & a_{i,i+1} = \Lambda_{g1}, \\ b_i = 0, \end{array}
```

- dla wiersza i =  $n_c + n_b + n_{cl}$ :  $a_{i,i-n_b-n_c} = \Lambda_{A1}, \quad a_{i,i-1} = -\Lambda_{g1}, \quad a_{i,i} = -\Lambda_{A1},$  $b_i = -\Lambda_{g1} \vartheta_w,$
- dla wiersza  $\mathbf{i} = \mathbf{n}_c + \mathbf{n}_b + \mathbf{n}_{c1} + 1$ :  $\mathbf{a}_{i,i-\mathbf{n}_b-\mathbf{n}_c} = \Lambda_{A2}, \quad \mathbf{a}_{i,i} = -\Lambda_{A2}, \quad \mathbf{a}_{i,i+1} = -\Lambda_{g2},$  $\mathbf{b}_i = -\Lambda_{g2} \, \mathfrak{D}_w,$
- $\begin{array}{l} \mbox{ dla wierszy } (n_c + n_b + n_{c1} + 2) \div (n_c + n_b + n_c 1): \\ a_{i,i-n_b-n_c} = \Lambda_{A2}, \quad a_{i,i-1} = \Lambda_{g2}, \quad a_{i,i} = -\Lambda_{A2}, \quad a_{i,i+1} = -\Lambda_{g2}, \\ b_i = 0, \end{array}$

```
- dla wiersza i = n_c + n_b + n_c:

a_{i,i-n_b-n_c} = \Lambda_{A2}, \quad a_{i,i-1} = \Lambda_{g2}, \quad a_{i,i} = -\Lambda_{g2} - \Lambda_{A2},

b_i = 0,

Pozostałe elementy macierzy [A] są równe 0.
```



# Fig.3. Thermal scheme of excitation winding

### 4. WYNIKI OBLICZEŃ

Na bazie przedstawionego algorytmu obliczeniowego opracowano program komputerowy, umożliwiający obliczenia rozkładu temperatur w prętach uzwojenia wzbudzenia generatora o chłodzeniu bezpośrednim. Po zadaniu ilości elementarnych odcinków (na które dzieli się poszczególne strefy) program określa liczbę połączonych łańcuchowo modułów cieplnych, wyznacza parametry elementów występujących w modułach, a następnie rozwiązuje układ równań algebraicznych.

Przeprowadzono obliczenia cieplne dla turbogeneratora typu TWW-200-2, z bezpośrednim wodorowym zabierakowym systemem chłodzenia uzwojenia wzbudzenia, o danych znamionowych:

 $S_{n} = 235 \text{ MV} \cdot \text{A}, \quad U_{n} = 15,75 \text{ kV}, \quad I_{n} = 8625 \text{ A}, \quad \cos \varphi_{n} = 0,8i, \quad I_{wn} = 2660 \text{ A}.$ a) pręt górny b) pret dolny 6.0 x10 [K] ×10 EK3 uzuojenie \$ 63 £₿ \$4 Przyrost temperatury, t temperatury, 1.2 4.9 UZUOIENIE 16 12 uodde uodór 14 25 Pr zyrost 2.4 11 21 LZ 1.1 1.6 27 część złobkowa cześć złobkowa część czołowa cześć czołowa odleołość od środka czół.1 odleutość od środka czół. I

Rys.4. Rozkład przyrostów temperatur wzdłuż długości pręta uzwojenia wzbudzenia Fig.4. Temperature rise distribution in exitation winding

Na rys.4 przedstawiono rozkład przyrostów temperatur wzdłuż długości górnego pręta (w części przyszczelinowej żłobka) i dolnego pręta (na dnie żłobka) oraz wodoru w kanałach chłodzących w części czołowej uzwojenia wzbudzenia. Obliczenia wykonano dla znamionowego prądu wzbudzenia generatora. Na podstawie otrzymanych rozkładów temperatur wyznaczono maksymalne przyrosty temperatury pręta górnego i dolnego, które wynoszą odpowiednio:  $\Delta \vartheta_{g max} = 68,2 \text{ K}$ i  $\Delta \vartheta_{d max} = 57,3 \text{ K}$ . Uzyskiwane pomiarowo średnie przyrosty temperatury uzwojenia wzbudzenia (na podstawie pomiarów rezystancji uzwojenia) wynoszą około  $\Delta \vartheta_{sr} = 63 \text{ K}$ . Największa nierównomierność rozkładu przyrostów temperatury (a zatem również maksymalna temperatura lokalna) występuje w górnym pręcie uzwojenia wzbudzenia. Należy mieć na uwadze, że przyjęcie założenia braku wymiany ciepła pomiędzy uzwojeniem wzbudzenia a odkuwką beczki wirnika prowadzi do uzyskiwania w wyniku obliczeń zawyżonych wartości przyrostów temperatur,

### LITERATURA

- [1] Bjorck A., Dahlquist G.: Metody numeryczne. WNT, Warszawa 1987,
- [2] Filippow I.F.: Osnowy tiepłoobmiena w elektriczieskich maszinach. Energija 1974.
- [3] Latek W.: Turbogeneratory. WNT, Warszawa 1973,
- [4] Latek W., Przybysz J.: Rozkład temperatur w uzwojeniu wirnika turbogeneratora z chłodzeniem bezpośrednim zabierakowym. Archiwum Elektrotechniki, Tom XVIII, zeszyt 3, 1969, ss.559÷568.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ernest Mendrela

Wpłynęlo do Redakcji dnia 25 marca 1994 r.

### Abstract

This paper presents a method of calculation of temperature space distribution in an excitation winding of a synchronous generator with a direct cooling system (Fig.1). Under the some simplifying assumptions differential equations of heat conduction for the bar excitation winding are obtained (eqns 1,2) and transformed to the difference equations (eqns 3,4). The thermal scheme of the bar of an excitation winding is

obtained as a result of chain connection of elementary thermal modules (Fig.3). The system of algebraical equations enabling calculate temperature rises in the bar of excitation winding in the TWW-200-2 generator is derived. Calculation results of the temperature rise distribution along the bar length and the temperature of hydrogen at end-connection cooling canals of the excitation winding for rated load are presented in the Fig.4. The results confirm the fact that the greatest distortion of temperature rises occurs in the upper bar of an excitation winding (close to air gap of a machine).