

Jan KAPINOS, Roman KROK, Roman MIKSIEWICZ

ROZKŁAD TEMPERATUR W PRĘCIE UZWOJENIA TWORNIKA GENERATORA SYNCHRONICZNEGO Z CHŁODZENIEM BEZPOŚREDNIM

Streszczenie. Przedstawiono model matematyczny do wyznaczania rozkładu temperatur w pręcie uzwojenia twornika generatora synchronicznego z chłodzeniem bezpośrednim. Zastępczy schemat cieplny pręta uzyskano po przekształceniu równań różniczkowych przewodnictwa ciepła do postaci równań różnicowych. Przedstawiono wyniki obliczeń rozkładu temperatur w uzwojeniu twornika generatora TWW-200-2.

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

Summary. The mathematical model for calculation of temperatures distribution in bar armature winding of synchronous generator with direct cooling system are presented. The equivalent thermal scheme of armature winding is obtained after transforming differential equations of heat conduction to difference equations. The results of calculation of temperature distribution in excitation winding of TWW-200-2 generators are presented.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В СТЕРЖНЕ ОБМОТКИ ЯКОРЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Резюме. Предложена математическая модель для определения распределения температур в стержне обмотки якоря синхронного генератора с непосредственным охлаждением. Получена тепловая схема замещения для стержня после превращения дифференциальных уравнений в алгебраические уравнения. Приведены результаты расчета распределения температур в обмотке якоря генератора ТВВ-200-2.

1. WSTĘP

Obliczenia cieplne generatorów synchronicznych mają szczególne znaczenie zarówno na etapie projektowania, jak również przy przeprowadzaniu zmian modernizacyjnych w celu podwyższenia mocy znamionowej turbogeneratorsa dzięki zastosowaniu nowych materiałów izolacyjnych i usprawnieniu względnie zmianie systemu chłodzenia. Dokładność obliczeń cieplnych jest zależna od przyjętego modelu opisującego układ chłodzenia, znajomości poprawnych wartości współczynników cieplnych materiałów czynnych, a przede wszystkim materiałów izolacyjnych oraz wartości współczynnika wnikania ciepła do medium chłodzącego. W turbogeneratorach dużej mocy stosuje się zwykle bezpośredni system chłodzenia uzwojeń twornika, w którym uzwojenie twornika jest bezpośrednio chłodzone wodą.

Rozkład temperatur w turbogeneratorze z chłodzeniem bezpośrednim może być wyznaczony metodą zastępczych schematów cieplnych lub metodą rozwiązywania układów równań różniczkowych (równań przewodnictwa ciepła), opisujących rozkład temperatur w poszczególnych elementach turbogeneratorsa. W niniejszym artykule przedstawiono metodykę obliczeń cieplnych rozkładu temperatur w prętach uzwojenia twornika turbogeneratorsa o chłodzeniu bezpośrednim przy wykorzystaniu zastępczych schematów cieplnych. Równania różniczkowe przewodnictwa ciepła sprowadzono do równań różnicowych, którym przyporządkowano zastępczy schemat cieplny pręta.

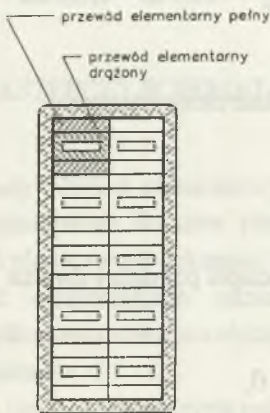
2. MODEL MATEMATYCZNY OPISUJĄCY ROZKŁAD TEMPERATUR W UZWOJENIU TWORNIKA

W rozwiązaniach praktycznych zwykle każdy zezwój uzwojenia twornika jest chłodzony niezależnie. Można więc przyjąć, że każdy zezwój znajduje się w identycznych warunkach cieplnych. W pracy ograniczono się do wyznaczenia rozkładu temperatur w obrębie jednego zezwoju uzwojenia twornika. Przy konstrukcji modelu matematycznego przyjęto następujące założenia upraszczające:

- wydzielone elementy poprzecznego przekroju maszyny (prostopadłego do osi maszyny) mają jednakową temperaturę w całym swoim przekroju - równą średniej temperaturze w tym przekroju,
- pominięto wymianę ciepła pomiędzy elementami blach stojana i elementami prętów uzwojenia,

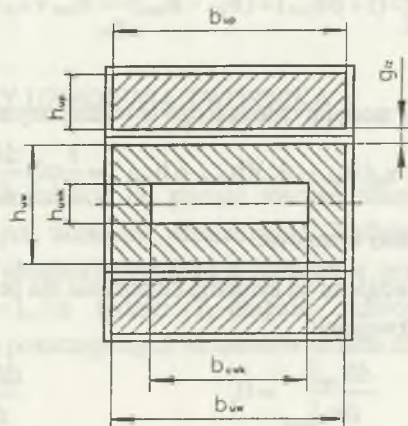
- nie ma wymiany ciepła pomiędzy elementami zezwoju uzwojenia a medium chłodzącym w komorach czolowych ,
- materiały przewodzące ciepło są pod względem cieplnym jednorodne,
- współczynnik wnikania ciepła oraz ciepło właściwe medium chłodzącego nie zależy do temperatury.

Przyjęto ponadto jako temperaturę odniesienia temperaturę wody po wyjściu z chłodnicy.



Rys.1. Przekrój poprzeczny pręta stojana

Fig.1. Cross-section of armature bar



Rys.2. Wymiary elementarnego przewodu pełnego i wydrążonego

Fig.2. Dimensions of solid and hollow conductor element

Pręt uzwojenia twornika zbudowany jest z określonej liczby przewodów elementarnych pełnych i przewodów wydrążonych, przez które przepływa medium chłodzące (woda) (rys.1). Ciepło odprowadzane jest z prętów uzwojenia stojana dwoma drogami: do wody przepływającej wewnątrz wydrążonych przewodów elementarnych oraz do pakietu blach rdzenia stojana. Strumień cieplny przechodzący z wydrążonych prętów do wody chłodzącej ma znacznie większą wartość od strumienia cieplnego przechodzącego przez warstwę izolacji żłobkowej pręta do pakietu blach rdzenia stojana. Ponieważ układ przewodów składający się z jednego przewodu elementarnego pełnego i połowy przewodu wydrążonego jest symetryczny i autonomiczny pod względem cieplnym, zatem rozważania ograniczono do takiego układu (rys.2).

Dla poszczególnych elementów takiego układu cieplnego pręta twornika rozkład temperatur opisuje układ równań różniczkowych [3]:

- dla pełnego przewodu elementarnego pręta:

$$p_u S_{up}(1 + \beta \vartheta_{up}) + \lambda_u S_{up} \frac{d^2 \vartheta_{up}}{dx^2} = (\vartheta_{up} - \vartheta_{uw}) \frac{\lambda_{iz}}{g_{iz}} b_{uw}, \quad (1)$$

- dla wydrążonego przewodu elementarnego pręta:

$$p_u \frac{S_{uw}}{2}(1 + \beta \vartheta_{uw}) + (\vartheta_{up} - \vartheta_{uw}) \frac{\lambda_{iz}}{g_{iz}} b_{uw} + \lambda_u \frac{S_{uw}}{2} \frac{d^2 \vartheta_{uw}}{dx^2} = \alpha_c (\vartheta_{uw} - \vartheta_c)(h_{uwk} + b_{uwk}), \quad (2)$$

- dla medium chłodzącego w wydrążonym przewodzie elementarnym:

$$\alpha_c (\vartheta_{uw} - \vartheta_c)(h_{uwk} + b_{uwk}) = \frac{1}{2} c Q \frac{d\vartheta_c}{dx}. \quad (3)$$

Warunki brzegowe:

- ze względu na symetrię cieplną nie ma przepływu ciepła pomiędzy dwoma zezwojami:

$$\left. \frac{d\vartheta_{up}}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{d\vartheta_{uw}}{dx} \right|_{x=0} = 0,$$

- przyrost temperatury wody na wlocie do kanału wydrążonego przewodnika jest równy 0:

$$\vartheta_c \Big|_{x=0} = 0,$$

- ze względu na symetrię cieplną nie ma przepływu ciepła pomiędzy dwoma zezwojami:

$$\left. \frac{d\vartheta_{up}}{dx} \right|_{x=1} = 0, \quad \left. \frac{d\vartheta_{uw}}{dx} \right|_{x=1} = 0,$$

gdzie:

p_u - jednostkowe straty mocy w przecię uzwojenia w temperaturze odniesienia,

S_{up}, S_{uw}, S_{uwk} - powierzchnie przekroju przewodów elementarnych (pełnego, wydrążonego) i kanału chłodzącego,

g_{iz}, λ_{iz} - grubość i przewodność cieplna izolacji między elementarnym przewodem pełnym i wydrążonym,

- $\vartheta_{up}, \vartheta_{uw}, \vartheta_c$ - przyrost temperatury przewodów elementarnych (pełnego, wydrążonego) i medium chłodzącego,
 Q - wydatek medium chłodzącego,
 α_c - współczynnik wnikania ciepła z powierzchni kanału do medium chłodzącego,
 c - ciepło właściwe medium chłodzącego,
 λ_u - przewodność cieplna właściwa miedzi.

3. ZASTĘPCZY SCHEMAT CIEPLNY UZWOJENIA TWORNIKA

Układy równań różniczkowych przekształcono do postaci równań różnicowych przez zastąpienie ilorazów różniczkowych ilorazami różnicowymi. Budując układ równań różnicowych dokonano podziału układu cieplnego na n -elementów, przy czym długość elementarnego odcinka $\Delta x = l_u / n$ (gdzie: l_u - długość zezwoju). Po uporządkowaniu równania różnicowe dla poszczególnych elementów układu cieplnego mają postać:

- dla i -tego elementu pręta pełnego :

$$P_{p(i)} - \Lambda_p (\vartheta_{p(i)} - \vartheta_{p(i+1)}) - \Lambda_p (\vartheta_{p(i)} - \vartheta_{p(i-1)}) - \Lambda_{pw} (\vartheta_{p(i)} - \vartheta_{w(i)}) = 0, \quad (4)$$

gdzie:

$$P_{p(i)} = P_p (1 + \beta \vartheta_{p(i)}), \quad P_p = p_u S_{up} \Delta x,$$

$$\Lambda_p = \frac{\lambda_u S_{up}}{\Delta x}, \quad \Lambda_{pw} = \frac{\lambda_{iz} b_{uw} \Delta x}{g_{iz}}, \quad S_{up} = h_{up} b_{up},$$

- dla i -tego elementu pręta wydrążonego:

$$P_{w(i)} - \Lambda_{pw} (\vartheta_{w(i)} - \vartheta_{p(i)}) - \Lambda_w (\vartheta_{w(i)} - \vartheta_{w(i+1)}) - \Lambda_w (\vartheta_{w(i)} - \vartheta_{w(i-1)}) -$$

$$- \Lambda_{wc} (\vartheta_{w(i)} - \vartheta_{c(i)}) = 0, \quad (5)$$

gdzie:

$$P_{w(i)} = P_w (1 + \beta \vartheta_{w(i)}), \quad P_w = p_u \frac{S_{uw}}{2} \Delta x$$

$$\Lambda_w = \frac{\lambda_u S_{uw}}{2 \Delta x}, \quad \Lambda_{wc} = \alpha_c (h_{uwk} + b_{uwk}) \Delta x, \quad S_{uw} = h_{uw} b_{uw} - h_{uwk} b_{uwk},$$

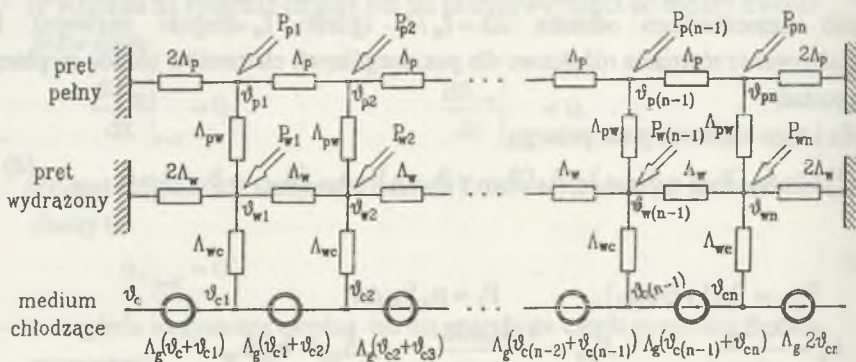
- dla i -tego elementu medium chłodzącego:

$$-\Lambda_{wc}(\vartheta_{c(i)} - \vartheta_{w(i)}) - \Lambda_g(\vartheta_{c(i)} - \vartheta_{c(i+1)}) + \Lambda_g(\vartheta_{c(i)} + \vartheta_{c(i-1)}) = 0, \quad (6)$$

gdzie:

$$\Lambda_g = \frac{1}{4} Q c.$$

Poszczególnym równaniom różnicowym przyporządkowano elementarne moduły ciepłne. Zastępczy schemat cieplny uzwojenia twornika turbogeneratora o chłodzeniu bezpośrednim uzyskuje się w wyniku łańcuchowego połączenia elementarnych modułów ciepłnych (rys.3). Poszczególne elementy zastępczego schematu ciepłnego pręta mają interpretację fizyczną. Istnieje możliwość stosunkowo prostej rozbudowy schematu i rezygnacji z niektórych założeń upraszczających przyjętych przy tworzeniu równań różniczkowych (1)-(3). Otrzymany schemat pozwala wyznaczyć wybrane globalne wielkości ciepłne, np. całkowitą ilość ciepła przepływającego z pręta wydrążonego do wody i z pręta pełnego do wydrążonego.



Rys.3. Zastępczy schemat cieplny uzwojenia twornika
Fig.3. Equivalent thermal scheme of armature winding

4. ALGORYTM OBLICZEŃ CIEPLNYCH

Na podstawie zastępczego schematu ciepłnego uzwojenia twornika można utworzyć układ równań algebraicznych, opisujący rozkład temperatur, o postaci:

$$[A][\vartheta] = [B], \quad (7)$$

gdzie:

[A] - kwadratowa macierz przewodności cieplnych o wymiarze $3n$,[g] - wektor temperatur węzłowych o wymiarze $3n$,[B] - wektor wymuszeń cieplnych o wymiarze $3n$.Elementy macierzy [A],[B] dla poszczególnych wierszy i - wynoszą:

- dla 1- ego wiersza:

$$a_{1,1} = \alpha P_p - \Lambda_p - \Lambda_{pw}, \quad a_{1,2} = \Lambda_p; \quad a_{1,n+1} = \Lambda_{pw},$$

$$b_1 = -P_p,$$

- dla wierszy $i=2+(n-1)$:

$$a_{i,i-1} = \Lambda_p, \quad a_{i,i} = \alpha P_p - 2\Lambda_p - \Lambda_{pw}, \quad a_{i,i+1} = \Lambda_p, \quad a_{i,n+i} = \Lambda_{pw},$$

$$b_i = -P_p,$$

- dla wiersza $i=n$:

$$a_{i,i-1} = \Lambda_p, \quad a_{i,i} = \alpha P_p - \Lambda_p - \Lambda_{pw}, \quad a_{i,n+i} = \Lambda_{pw},$$

$$b_i = -P_p,$$

- dla wiersza $i=n+1$:

$$a_{i,i-n} = \Lambda_p, \quad a_{i,i} = \alpha P_w - \Lambda_w - \Lambda_{pw} - \Lambda_{wc}, \quad a_{i,i+1} = \Lambda_w, \quad a_{i,n+i} = \Lambda_{wc},$$

$$b_i = -P_w,$$

- dla wierszy $i=(n+2)+(2n-1)$:

$$a_{i,i-n} = \Lambda_{pw}, \quad a_{i,i-1} = \Lambda_w, \quad a_{i,i} = \alpha P_w - 2\Lambda_w - \Lambda_{pw} - \Lambda_{wc}, \quad a_{i,i+1} = \Lambda_w,$$

$$a_{i,n+i} = \Lambda_{wc},$$

$$b_i = -P_w,$$

- dla wiersza $i=2n$:

$$a_{i,i-n} = \Lambda_{pw}, \quad a_{i,i-1} = \Lambda_w, \quad a_{i,i} = \alpha P_w - \Lambda_w - \Lambda_{pw} - \Lambda_{wc}, \quad a_{i,n+i} = \Lambda_{wc},$$

$$b_i = -P_w,$$

- dla wiersza $i=2n+1$:

$$a_{i,i-n} = \Lambda_{wc}, \quad a_{i,i} = -\Lambda_{wc}, \quad a_{i,i+1} = -\Lambda_g,$$

$$b_i = -\Lambda_g g_c,$$

- dla wierszy $i=(2n+2)+(3n-1)$:

$$a_{i,i-n} = \Lambda_{wc}, \quad a_{i,i-1} = \Lambda_g, \quad a_{i,i} = -\Lambda_{wc}, \quad a_{i,i+1} = -\Lambda_g,$$

$$b_i = 0,$$

- dla wiersza $i=3n$:

$$a_{i,i-n} = \Lambda_{wc}, \quad a_{i,i-1} = \Lambda_g, \quad a_{i,i} = -\Lambda_g - \Lambda_{wc},$$

$$b_i = 0.$$

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

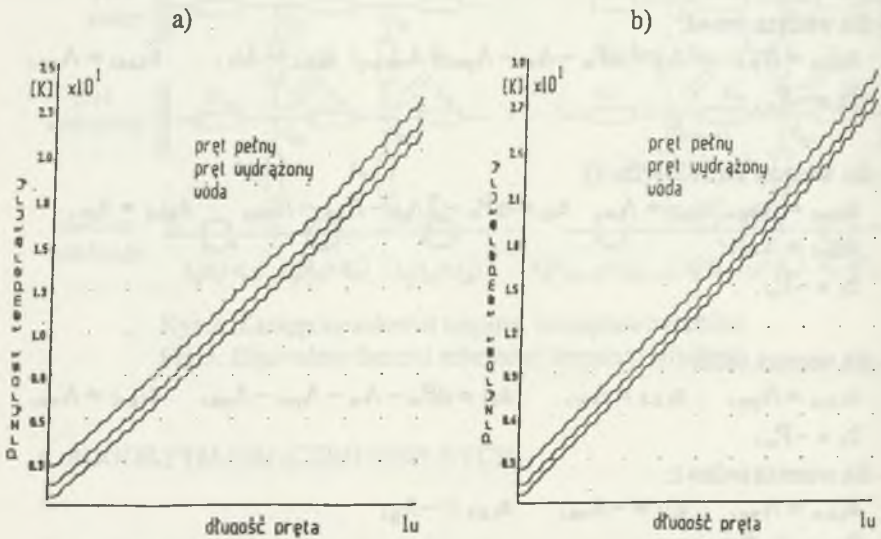
Zwiększenie liczby przedziałów elementarnych - n powoduje zmniejszenie błędu obliczeniowego, wynikającego z dyskretyzacji równań różniczkowych oraz wzrost liczby równań i tym samym czasu obliczeń.

5. WYNIKI OBLICZEŃ

Na podstawie przedstawionego algorytmu obliczeniowego opracowano program komputerowy, umożliwiający obliczanie rozkładu temperatur w uzwojeniu twornika.

Przeprowadzono obliczenia cieplne (rys.4) dla turbogeneratorskiego typu TWW-200-2 (o bezpośrednim wodnym systemie chłodzenia) o danych znamionowych:

$$S_n = 235 \text{ MV} \cdot \text{A}, \quad U_n = 15,75 \text{ kV}, \quad I_n = 8625 \text{ A}, \quad \cos \varphi_n = 0,8i, \quad I_{wn} = 2660 \text{ A}.$$



Rys.4. Rozkład przyrostów temperatury wzdłuż długości uzwojenia twornika;

a) znamionowy wydatek wody, b) wydatek wody zmniejszony o 20%

Fig.4. Temperature rise distribution in armature winding;

a) nominal discharge of water, b) discharge of water decreased of 20%

Dla rozważanego generatora przyrosty temperatur w prętach uzwojenia twornika i wody chłodzącej w części wylotowej przy znamionowym wydatku wody wynoszą:

- dla prętów uzwojenia: pomiar - $\vartheta_p = 28,2 \text{ K}$, obliczenia - $\vartheta_p = 23,2 \text{ K}$,
- dla wody chłodzącej: pomiar - $\vartheta_c = 24 \text{ K}$, obliczenia - $\vartheta_c = 20,5 \text{ K}$.

Porównanie wyników przyrostów temperatur w pręcie uzwojenia twornika, uzyskanych metodą obliczeniową i pomiarową, daje stosunkowo dobrą zgodność.

Przedstawiona metoda obliczeń cieplnych generatora wymaga dalszych prac mających na celu uwzględnienie wymiany ciepła między uzwojeniem twornika a obwodem magnetycznym oraz wpływu zakłóceń w układzie chłodzenia, np. zatkanie części wydrążonych przewodów elementarnych na rozkład temperatur w przekroju poprzecznym i wzdłuż długości uzwojenia.

LITERATURA

- [1] Bjorck A., Dahlquist G.: Metody numeryczne. WNT, Warszawa 1987.
- [2] Filippow I.F.: Osnovy tieploobmiena w elektriczeskich maszinach. Energija 1974.
- [3] Latek W., Bytnar A., Roguski S.: Rozkład temperatury w stojanie turbogeneratora dużej mocy z chłodzeniem bezpośrednim. Archiwum Elektrotechniki, Tom XVII, zeszyt 4, 1968, ss.685+703.
- [4] Titow W.W. i drugije: Turbogienieratory. Rascziet i konstrukcija. Energiija 1967.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ernest Mendrela

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994 r.

Abstract

The paper presents a method of calculation of temperature distribution in the bar of armature winding in a synchronous generator with direct cooling system. It is based on

the method of equivalent thermal schemes. The differential equations (eqns 1,2,3) describing temperature distribution in the elementary winding bars and in the cooling medium are transformed to difference equations (eqns 4,5,6). An elementary thermal module is assigned to these difference equations. The equivalent thermal scheme of the armature winding can be presented in the form of chain connection of elementary modules. The thermal scheme (Fig.3) is described by the system of algebraic equations (eqns 7). Basing on the presented mathematical model calculations of temperature distribution in the bar of armature winding of the TWW-200-2 generator are carried out. The results (for two discharges of water) are presented in the Fig.4. The obtained results of calculations show the great conformity to results of temperature measurements.

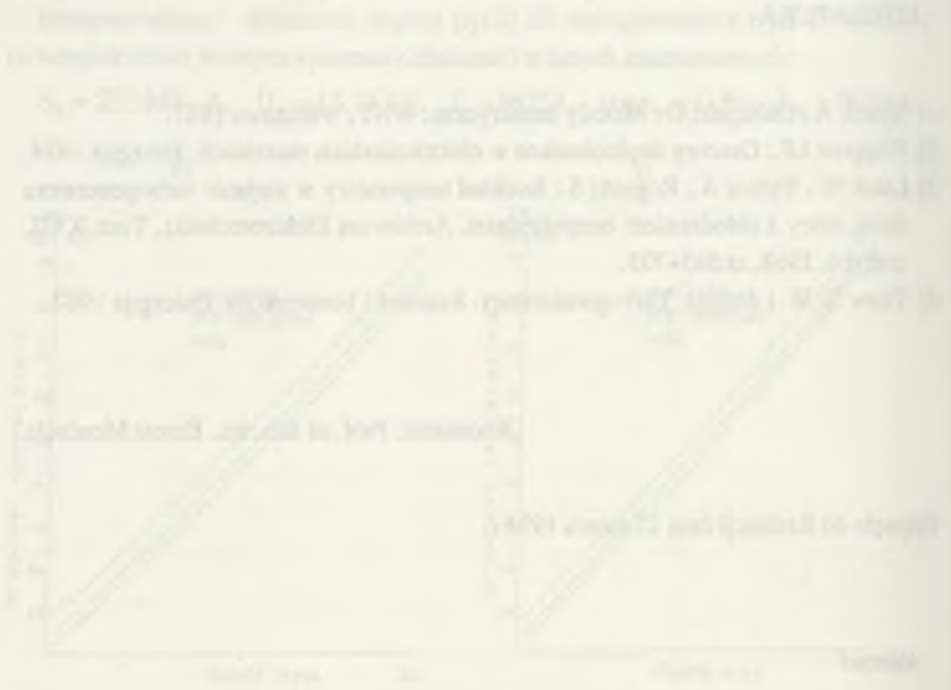


Fig. 4. Comparison of calculated and measured temperature profiles. (a) Temperature profile in the armature winding bar. (b) Temperature profile in the cooling medium.