ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: ENERGETYKA z. 107

Nr kol. 1041

Jerzy BŁAŻEJOWSKI Bohdan CHOROWSKI

Instytut Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej

SONDA DO DIAGNOZOWANIA NAPRĘŻEŃ TERMICZNYCH W WIRNIKACH TURBIN PAROWYCH<sup>X)</sup>

> Streszczenie. W pracy podano teoretyczne podstawy pomiaru naprężeń termicznych w wirniku turbiny sondą umocowaną w korpusie turbiny. Podetawy teoretyczne dają tylko ogólne wskazania dotyczące konstrukcji sondy. W zalażności od konstrukcji wirnika należy przeprowadzić optymalizację wymiarów sondy. Podano przykład optymalizacji wymiarów sondy dla wirującego walca omywanego strumieniem powietrza.

#### 1. WSTEP

W trakcie ekaploatacji turbin parowych, szczególnie przy rozruchu i odatawianiu, powstają w zespołach metalowych nierównomierne pola temperatur powodujące naprężenia termiczne. Przy zbyt dużych wartościach i cyklicznym występowaniu tych naprężań mogą one powodować przedwczesne zużycie turbiny. Krytyczne miejsca ze względu na naprężenia termiczne występują w wirnikach (szczególnie turbin reakcyjnych) lub korpusach. Jak dotychczas, nie ma możliwości bezpośredniego pomiaru naprężeń termicznych. Naprężenia termiczne wyznacza się więc na podstawie pola temperatur i odtworzenie pola temperatur w modelu symulacyjnym matematycznym (analogowym, cyfrowym) lub fizycznym.

W symulacji pola temperatur i naprężeń termicznych stosowane są na ogóż modele analogowe. Jednym z najważniejszych problemów jest przyjęcie formuły uzależniającej współczynnik przejmowania ciepła od czynnika grzejnego do metalu wirnika lub korpusu. Wartość tego współczynnika decyduje o dokładności wyznaczania temperatur. W pracy [1] uzależniono współczynnik przejmowania ciepła od ciśnienia, temperatury i całkowitej prędkości pary względem wirnika. W pracach [2,3] współczynnik ten uzależniono od predkości obrotowej i mocy bądź tylko od ciśnienia.

\*<sup>2</sup> Praca wykonana w ramach CPBP nr 02.18, kierunek 2, zad. 2,3,4,6.

Spotyka się również ominięcie tego problemu przez założenie, że temperatura powierzchni zewnętrznej wirnika jest równa temperaturze powierzchni wewnętrznej korpusu (firma Tosibe) [4]. Modele anelogowe maję także różną postać. Firma Hitachi [4] zastosowała układ analogowy, w którym pochodną przestrzenną w równaniu przewodnictwa ciepła aprokaymowano różnicowo w siedmiu punktach, uzyskując układ siedmiu liniowych równań różniczkowych zwyczajnych.

Instytut Energetyki [5] do symulecji etanu termicznego turbiny użyż modelu w postaci członu różniczkującego z inercyjnością drugiego rzędu. Współczynniki transmitancji tego modelu są funkcją liczby Biota, zależnej z kolei od mocy i prędkości obrotowej turbiny.

Zaletę modeli analogowych jest ich szybkie przetwarzania, co zapawnia pracę w czasie rzeczywistym, a wadą znaczne uproszczenie równań opisujących rozkład temperatur, jak również konieczność przyjącia nie w pełni dokładnej formuły na współczynnik przejmowania ciepła.

W modelach cyfrowych, jak dotychczas znacznie mniej rozpowszechnionych od analogowych, mogą występować trudności związane z koniecznością prowadzenia obliczeń w czasie rzeczywistym i podobnie jak w modelach analogowych z koniecznością przyjęcia formuły do wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła.

W modelu fizycznym mającym poatać sondy montowanej w korpusie zagadnienie formuły do wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła nie występuje. Końcówka sondy jast bowiem omywana podobnie jek i wirnik przez ten asm strumień pary. (Różnice spowodowane są ruchem obrotowym wirnika).

Teoria sondy wynika z analizy pół temperatur i naprążeń. Na tej podstawie można wykazać, ża przy pewnych założeniach upraszczających naprężenia termiczne w rozważanym elemencie są proporcjonalne do tak zwanej równoważnej różnicy temperatur. Jest to różnice miądzy temperaturę średniocałkową w materiale a temperaturę powierzchni przyjmującej ciepło.

Zagadnienie sprowadza się więc do określenia temperatur; średniocałkowaj i na powierzchni materiału sondy oraz do wyznaczenia korelacji między równoważnymi różnicami temperatur sondy i wirnika.

Ten sposób pomieru naprężeń termicznych w wirniku turbiny zestosowała firme BBC [4].

## 2. MODELE PÓL TEMPERATUR

W [6] wykazano, że przy uporządkowanej wymianie ciepła (liczba Fouriera Fo > 0.5), w izotropowym materiale, jednorodnym warunku brzegowym drugiego rodzaju (warunek Neumanna), stałym w czasie warunku na drugim brzegu i jednorodnym początkowym rozkładzie temperatur współrzędna punktu, w którym temperatura jest równa średniocałkowej, ustala się. Jest to tak zwany punkt charakterystyczny. Przy niektórych kształtach materiału współrzędną tę można wyznaczyć analitycznie. Na przykład: Sonda do diagnozowania naprężeń,...

dla ścianki płaskiej	× <sub>u</sub> ≈1 √3/3 ,
dla pełnego walca (l=r)	$x_{u} = 1 \sqrt{2}/2$ , (1)
dla pełnej kuli (l=r)	x <sub>u</sub> =1 √15/5

W [6] wykazano także, że przy niejednorodnym początkowym rozkładzie temperatur i zmiennym liniowo w czasie strumieniu ciepła różnica temperatur średniocałkowej i występującej w punkcie charakterystycznym nie przekraczały 3%.

W pracach [7,8] zajmowano się także zależnościami określającymi położenie punktu charakterystycznego. Uzyskano uogólnioną zależność na współrzędną punktów charakterystycznych X<sub>u</sub> po upływie dostatecznie długiego czasu:

$$X_{u} = \lim_{t \to \infty} x(t) = 1 \sqrt{\frac{m}{m+2}}$$
(2)

Parametr m jest równy 1,2 lub 3, odpowiednio dla ścianki walca i kuli. Wzór (2) jest uogólnieniem (1).

Podano również wpływ warunków wymiany ciepła na położenie punktu charakterystycznego X/l (tabela 1).

Tabela 1

Położenie punktu charakterystycznego X/1 dla wymuszenia skokowego

81	m=1	m=2	m=3
0	0,577	0,707	0,775
200	0,599	0,682	0,742

Podsumowując, można stwierdzić, że położenie punktów charakterystycznych zależy od kaztałtu rozważanego elementu (współczynnik m), warunków wymiany ciepła (liczba Bi) oraz czasowych zmian wymuszania (warunki brzegowe). Rozwiązania analityczne można uzyskać przy niezmiennym w czasie współczynniku wymiany ciepła (Bi=idem), uporządkowanej wymianie ciepła (Fo > 0,5), dla wymuszeń skokowych lub liniowo narastających oraz przy niezmiennych własnościach fizycznych materiału.

Położenia punktu charakterystycznego w początkowym okresie grzania (przy uporządkowanej wymianie ciepła) można wyznaczyć tylko numerycznie.

# 3. MODELE PÓL TEMPERATUR W WIRNIKU I SONDZIE

Wirnik turbiny reakcyjnej jest walcem miejscami wydrążonym o mażej zbieżności osiowej. Ogólnie ze względu na symetrię kołową pole temperatur w wirniku jest opisane dwuwymiarowym równaniem przewodnictwa we współrzędnych walcowych.

W pracy [9] wykazano, że pominięcie osiowego przewodzenia ciepła w wirniku daje około 5% zwiększenie obliczanych wartości naprężeń termicznych. Ponieważ stwarza to zwiększenie zapasu bezpieczeństwa ze względu na naprężenia termiczne, a jednocześnie w zasadniczy sposób zmniejsza czasochłonność obliczeń, zdecydowano się na zastosowanie jednowymiarowego równania przewodnictwa ciepła we współrzędnych walcowych.

Sonda temperaturowa jest walcem o jednej powierzchni czołowej ogrzewanej przez parę i zaizolowanych pozostałych powierzchniach (rys. 1). Wobec braku oddawania ciepła przez pobocznicę walca rozkład temperatury w sondzie odpowiada rozkładowi w płycie płaskiej o jednej powierzchni ogrzewanej i zaizolowanej pozostałej.

Jeśli wirnik i sonda są wykonane z tego samego materiału, to do opisu własności termofizycznych metalu można użyć tych samych symboli.



Rys. 1. Schemat przekazywania ciepła do wirnika i sondy Fig. 1. Diagram of the heat transfer to the wheel and probe Po wprowadzeniu parametru m (m=1-sonda, m=2-wirnik) opis pole temperatur wirnika i sondy možna przedstawić w jednolitej posteci  $\{S\}$  :  $\{U\}$ :

$$\frac{1}{1-k^2} \frac{\partial T(Fo,z)}{\partial Fo} = \frac{1}{z^{n-1}} \frac{\partial}{\partial z} \left[ z^{n-1} \frac{\partial T(Fo,z)}{\partial z} \right]$$
(3)

$$\frac{\partial T(Fo,z)}{\partial z} = 0$$

$$z = k$$

$$(4)$$

$$\frac{\partial T(Fo,z)}{\partial z} = Bi \left[ T(Fo,z) - T_3(Fo) \right]$$

$$z=1$$
(5)

$$T(0,z) = T_0(z)$$
(6)

odzie:

 $z = \frac{y}{y_{pr}}$  $k = \frac{y_{12}}{y_{pr}}$ 

Bi = 
$$\frac{Hy_{pr}}{\lambda}$$

$$F_0 = \frac{\lambda}{c_0} \frac{(y_{0r} - y_{12})^2}{(y_{0r} - y_{12})^2}$$

Umiejscowienie osi przestrzennej dla sondy i walca pokazuje rys. 1.

4. MODELE NAPRĘŻEŃ TERMICZNYCH

Przyjęto następujące założenia:

- naprężenia nie przekraczają granicy sprężystości,
- materiał jest jednorodny i izotropowy,
- parametry V,E,p nie zależą od temperatury,
- siły bezwładności spowodowane odkształceniami mechanicznymi i termicznymi są pomijane,
- rozpatrywany przekrój walca jest na tyle oddalony od końców, że występuje w nim stan płaskiej deformacji.

J. Błażejowski, B. Chorowski

Równania termosprężystości umożliwiają wyznaczenia naprężeń normalnych promieniowych  $\mathcal{G}_r$ , etycznych  $\mathcal{G}_t$  i osiowych  $\mathcal{G}_z$ . W każdej ze składowych naprężeń normalnych występuję naprężenia od sił odśrodkowych, ciśnienia na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni w walcu wydrążonym, nagrzewania oraz od siły osiowej.

Największe wartości naprężeń spowodowane polami temperatur osiągają naprężenia styczne na powierzchni wymiany ciepła. Przy ogrzewaniu występują naprężenia rozciągające (ujemne), a przy schładzaniu ściskające (dodatnie).

Składowe naprężeń stycznych spowodowane zmianami temperatury na powierzchni wymiany ciepła są następujące [9]:

$$G_{t}^{T}(r) = \frac{E}{1-\gamma} \left[F(r_{z}) \frac{r_{z}^{2}}{r_{z}^{2} - r_{w}^{2}} \left(1 + \frac{r_{w}^{2}}{r^{2}}\right) + F(r) - \sigma T(r)\right]$$
(7)

gdzie:

$$F_{r}(r) = \frac{1}{r^{2}} \int_{\Gamma_{w}} r \alpha T(r) dr \qquad (8)$$

Stad

$$G_{\tau}^{T}(r_{z}) = \frac{E}{1-v} \left[ F(r_{z}) \frac{2 r_{z}^{2}}{r_{z}^{2} - r_{w}^{2}} - \alpha \tau(r_{z}) \right]$$
 (9)

Temperaturę średniocałkową T<sub>śr</sub> wyznacza się z uogólnionego wzoru:

$$T_{\rm dr} = \frac{m}{r_{\rm Z}^{\rm m} - r_{\rm W}^{\rm m}} \int_{r_{\rm W}}^{r_{\rm Z}} r^{\rm m-1} T(r) \, dr \qquad (10)$$

Po przyjęciu dla walca m=2:

$$T_{\rm dr} = \frac{2}{r_z^2 - r_w^2} \int_{r_w}^{r_z} rT(r) \, dr$$
(11)

(współczynnik rozszerzelności lniowej ∝ nie zależy od temperatury) możne wyznaczyć naprężenia styczne na powierzchni zewnętrznej walca. Ostatecznie uzyskuje się:

$$G_{t}^{T}(r_{z}) = \frac{E\alpha}{1-\psi} \left[ T_{sr} - T(r_{z}) \right] = \frac{E\alpha}{1-\psi} \Delta T$$
(12)

### Sonda do diagnozowanie naprężeń...

Z (12) wynika, że składowa termiczna o największych wartościach tensora naprężeń jest proporcjonalna do różnicy  $\Delta T$  temperatury średniocałkowej i temperatury na powierzchni.

# 5. ANALIZA BŁĘDÓW PRZY WYZNACZANIU NAPRĘŻEŃ TERMICZNYCH NA PODSTAWIE DWUPUNKTOWEGO POMIARU TEMPERATURY

Analizę błędów przeprowadzono wyznaczając numerycznie dla walca położenie punktu o temperaturze równej średniocałkowej oraz temperaturę w punkcie charakterystycznym.

Obliczenia wykonano dla szeregu wartości liczby B1, kilku promieni wewnętrznych w walcu wydrężonym oraz wymuszeniach skokowych i liniowo narastajęcych.

Punkt charakterystyczny, w którym temperatura jest równa średniocałkowej, przemieszczał się od powierzchni wymiany ciepłe ze zmniejszającą się szybkością, osiągając ustalone położenie r<sub>u</sub> przy wymuszeniu skokowym lub liniowo narastającym odpowiednio po około 0,2 Fo i 0,5 Fo (rys. 2).



Rys. 2. Zmiany polożenia punktu charakterystycznego po wymuszeniu skokowym Fig. 2. Changes in the characteristic point position after step function

Współrzędna punktu charakterystycznego r<sub>u</sub> przy wymuszeniu liniowym była stała, a przy wymuszeniu skokowym tylko w nieznacznym stopniu zależy od liczby 81.

(różnica 
$$\left| \frac{\Gamma_{u} - \Gamma_{u \pm r}}{1} \right|$$
 100% < 0,6% przy Bi = 5 ÷ 500)

Naprężenia wyznaczane na podstawie pomiaru różnicy temperatur w walcu ze wzoru (13) porównywane były z wyliczonym ze wzoru (9).

$$G_{tp}(r_z) = \frac{E^{\infty}}{1-\sqrt[3]{2}} \left[ T(t,r_p) - T(t,r_z) \right]$$
(13)

Ponieważ temperatura  $T(t,r_p)$  jest równa temperaturze  $T_{\rm sr}$  po upływie czasu warunkującego uporządkowaną wymianę ciepła w początkowym okresie grzania występują znaczne (około 18%) błędy. Przebieg błędu wyznaczania naprężeń  $\mathcal{E}_{6}$  (t) podano na rys. 3.

$$S_{5}(t) = \frac{S_{tp}(r_{z}) - S_{t}(r_{z})}{S_{t}(r_{z})} = 100\%$$
(14)

Nie ma to wpływu na bezpieczeństwo pracy turbiny, bowiem w tym okresie naorężenia termiczne aą stosunkowo małe (rys. 4).









Rys. 4. Naprężenia styczne  $\Im_t(t,r_z)$  i wyznaczone wg (13) Fig. 4. Shear stresses  $\Im_t(t,r_z)$  and stresses determined according to (13)

### Sonda do diagnozowania naprężeń...

Na błąd w wyznaczaniu naprężeń ma także wpływ nierówność  $r_p \neq r_u$ . Jeśli  $r_p$  jest większe od  $r_u$ , to temperatura  $T(r_p)$  jest większa od temperatury  $T_{sr}$ . Różnica temperatur  $\Delta T$  w (12) będzie mniejsza od faktycznej, a stąd także i naprężenia wyliczone będą mniejsze od faktycznych. Przy  $r_p$  mniejszym od  $r_u$  naprężenia będą większe od faktycznych. Dobierając od-powiednio wymiar  $r_p$  można uzyskać kompensację wpływów spowodowanych izolacją cieplną sondy, otworami na termoslementy itp.

### 6. OPTYMALIZACJA WYMIARÓW SONDY (rys. 5)

Powyżej przedstawione rozważania teoretyczne i wyniki obliczeń prowadzą do wniosku, że na podstawie pomiaru dwóch temperatur sondy możne wyznaczyć naprężenia w wirniku. Błędy takiego odwzorowania zależą od geometrii i własności fizycznych zarówno sondy, jak i materiału izolującego. Na drodze obliczeniowej wybrano długość sondy i punkt usytuowania wewnętrznej termopary. Druga termopara usytuowana jest w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni wymieniającej ciepło. Zakłada się, że mierzy temperaturę tej powierzchni.



Rys. 5. Sonda temperaturowa Fig. 5. Temperature probe

#### J. Błażejowski, B. Chorowski

(16)

Zadanie optymalizacji sformułowano następująco:

Należy dobrać długość sondy L oraz punkt pomiaru temperatury wewnętrznej r – spełniające warunki (15) – tak aby funkcja celu f<sub>1</sub> (16), bedaca miarę błędów wskazań sondy e(t), była minimalna.

$$L > 0; \quad 0 < r_{p} < L$$
 (15)

$$\int_{0}^{T} |e^{2}(t)| dt$$
 dia i=1  
o  
$$\int_{0}^{T} |G(r)| e^{2}(t) dt$$
 dia i=2

f1(L,r)=

$$\int_{0}^{T} \left\{ \left| G_{t}(r_{z}) \right| \left[ \frac{\left( e(t) + \left| e(t) \right| \right)^{2}}{4} + e^{2}(t) \right] \right\} dt \quad dls \quad i=3$$

gdzie:

$$e(t) = G_{t}(t) - \beta \left[ T(r_{0}, t) - T(L, t) \right]$$
 (17)

$$\beta = \frac{E\alpha}{1-\sqrt{2}}$$

 $G_t(t)$  - naprężenie stanowiące rozwiązanie zagadnienia (3) - (8) dla walca.

Odchyżka e(t) określona wzorem (17) jest niejawną funkcją szukanych zmiennych L i  $r_p$ . Występujące we wzorze (17) temperatury T(t, $r_p$ ) oraz T(t,L) bądą mierzone w trakcie eksperymentu, a na etapie obliczeń optymalizacyjnych są wybranymi punktami rozkładu tmmperatury stanowiącego rozwiązanie zagadnienia (3)  $\div$  (6) dla płyty.

Zagadnienia (3) - (6) dla walca i płyty rozwiązywane były przy identycznych warunkach:

- liniowym naroście wymuszenia Ts(t),

rozkładzie początkowym,

- własnościach termofizycznych materiału  $\lambda$  ,c.p.

- współczynnikach wnikania ciepła,

Przy liniowym naroście temperatury czynnika rozciągające naprężenia styczne w wirniku rosną ze zmniejszającą się szybkością. Jak wykazały próbne obliczenia, całkowania występujące we wzorach (16) można przerwać w chwili, gdy przyrost naprężeń stycznych w ciągu odcinka czasu równego krokowi dyskretyzacji był mniejszy niż 1% ostatniej wartości naprężeń.

Sonda do diagnozowania naprężeń...



Rys. 6. Algorytm optymalizacji wymiarów sondy Fig. 6. Probe dimensions optimization algorithm

# J. Błażejowaki, B. Chorowski

Do rozwiązania wyżej eformużowanego zadania optymalizacji atatycznaj z ograniczeniami zastosowano metodę gradientów sprzężonych (rys. 6) [10]. Metoda ta polega na wyborze wartości minimalnej funkcji w kierunku przeciwnym do gradientu wyznaczonego w punkcie startowym, sprawdzeniu warunku zakończania obliczeń i ewentualnie poszukiwaniu minimum w nowo wyznaczonym kierunku.

Estymację gradientu wykonywano na podstawie dwuwymiarowego symplekau o promieniu 0,5 ‰ początkowej długości sondy L<sup>0</sup>.

Przy wyznaczaniu minimum w kierunku – ze względu na znaczny nakład obliczeń dla wyznaczania wartości funkcji celu – zastosowano interpolację kwadratową.

Warunkiem zakończenia poszukiwania minimum w danym kierunku było zmniejszenie większego z przyrostów  $\delta L = L^{j1} - L^{j1+1}$  (lub  $\delta r_p$ ) poniżej 1%. wartości początkowej L<sup>O</sup> (lub odpowiednio  $r^o$ ).

Warunkiem zakończenia obliczeń było uzyskanie w dwóch kolejnych kierunkach długości aondy różnięcej się o mniej niż 1‰ długości początkowej L<sup>0</sup>.

W przypadku gdy algorytm poazukiwań minimum w kierunku powodował naruszenie któregokolwiek z ograniczeń (15) ze względu na brak sensu fizycznego wyników – obliczenia przerwano. Aby tego uniknąć, należało zadać wyaw tarczająco mały krok poszukiwań minimum. Stosowano krok przestrzenny równy 20% L<sup>0</sup>.

Ponawianie obliczeń z różnych punktów startowych powodowało zatrzymanie programu w różnych punktach nie będących minimum globalnym. Interesujący obszar podzielono więc ortogonalną rodziną prostych w celu wyznaczenia izolinii. Ich obraz dla funkcji celu f<sub>1</sub> przedstawia rys. 7. Pole funkcji celu ma kaztałt "kanionu" o znacznym przyroście wartości w kierunku prostopadłym do jego osi i nieznacznym – w kierunku osiowym. Program wytyczał kierunek poszukiwań prostopadły do osi i nie powodował przesuwania wzdłuż niej. Wznowienie obliczeń z punktu startawego usytuowanego w pobliżu przewidywanego minimum zakończone zostało sukcesem.

Obliczenia prowadzono dla danych wynikających z przewidywanego eksperymentu mającego na celu ocenę wpływu pominiętych w obliczeniach czynników – takich jak różnica we współczynnikach wnikania, niedoskonała izolacja, niedokładność usytuowania termopar, błędy pomiarowe itd. – na dokładność wskazań sondy.

Algorytm optymalizacji jest również zbieżny dla skokowych zmian wymuszenia. (W inny sposób należy wówczas określić  $\tilde{c}$  we wzorach (16)).

Końcowym sprawdzianem obliczeniowym była symulacja nagrzewu wirnika i sondy według kształtu wymuszenia zaczerpniętego z [11], a pokazanego na rys. 8. Naprężenia w wirniku oraz wskazania sondy obrazuje rys. 9. Błędy nie przekraczały 5%.



Rys. 7. Obraz izolinii funkcji celu f<sub>1</sub> Fig. 7. Isoline image of the objective function  $f_1$ 

Funkcja f<sub>2</sub> w porównaniu z f<sub>1</sub> ma wagę od naprężeń i powinna dawać dokładniejsze wyniki dla dużych wartości naprężeń, natomiest funkcja f<sub>3</sub> posiada dodatkowy człon wnoszący karę od zbyt małych wskazań sondy. Różnice wyników optymalizacji dla wyżej przedatawionych funkcji celu były marginalne. Dla danej długości sondy różnice optymalnego usytuowania pomiaru temperatury nie przekroczyły 0,5% r<sub>p</sub>.







Rys. 9. Naprężenie wirnika i wskazania sondy Fig. 9. Wheel stresses and probe indications





Rys. 10. Błąd wskazań sondy Fig. 10. Probe indication error

# 7. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych obliczeń potwierdzają możliwość określania naprężeń termicznych powstałych w elementach walcowych (np. wirniki), poprzez pomiary temperatur nieruchomą sondą.

Prezentowany sposób doboru długości sondy i punktu pomiaru temperatury średniocałkowej zapewnia uzyskanie konstrukcji, która umożliwia wyznaczenie naprężeń przy typowych w trakcie pracy turbiny przebiegach czasowych temperatury pary.

Należy sprawdzić doświadczalnie wpływ nie uwzględnionych w obliczeniach czynników na dokładność wskazań sondy.

# OZNACZENIA

- Bi liczba Biota;
- c ciepło właściwe; kJ/(kg.K),
- e odchyłka, MPa;
- E moduž Younga, MPa;
- f funkcja celu, MPa.s, (MPa)<sup>2</sup>.a;

J. Błażejowski, B. Chorowski

Fo	-	liczba Fouriera;
H	-	współczynnik wnikania ciepła, W/(m <sup>2</sup> . K);
1	-	wymiar liniowy (grubość), m;
L	~	długość sondy, m;
m	~	parametr;
r.	-	promień, m;
t	-	CZ88, 8;
т	-	temperatura, <sup>O</sup> C;
х	-	położenie punktu charakterystycznego, m;
У	-	zmienna geometryczna, m;
z	-	zmienna geometryczna, m;
сĈ	-	współczynnik termicznej rozszerzelności liniowej, 1/K;
λ	-	współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m·K);
V	-	liczba Poissona;
9	-	gęstość, kg/m <sup>3</sup> ;
G	-	naprężenia, MPa;
T	-	czas całkowania, a.

Indeksy

le	-	lewe,
ρ	-	pomiarowa,
pocz	-	początkowe,
pr	-	prawe,
r	-	promieniowe,
8	-	styczne,

u – ustalone,

- w wewnętrzne,
- z zewnętrzne, poosiowe.

LITERATURA

- [1] Pasquantonio E.D.: Solution of Some Unsteady Problems of Heat Conduction in Cylindrical Geometry with Axial Symetry. Thermal stresses and thermal fatigue: Ed. by Litter, London 1969.
- [2] Pochorilar V.L., Pomorcewa A.A.: Kontrol i optimizacija elemientow moszcznych turboustanowok s ispolzovanijem impulsa po sriednej tiempieraturia. Energetika nr 2 1980.
- [3] Lejzerovicz A. Sz. i inni: Promyszlennyje ispytanija makieta ustrojstwa dla eksploatacionnogo kontrola za progriewom rotorow moszcznych parowych turbin.
- [4] Kożuchowski J.: Sterowanie systemów elektroenergetycznych. PWN, Warszawa 1981.
- [5] Plucińska~Klawe M., Waglowski St.: Projekt układu bezpiecznej pracy bloku 500 MW El. Kozienice i sposób jago realizacji. Warszawa 1976 (niepublikowane).

- [6] Kudrjawcew E.W., Sumakow N.W.: Mietod sriedniej tiempieratury dla izuczenija processa nagriewa twierdogo tieła. ZTF Nr 4 Tom 27, rok 1957, ss. 856-867.
- [7] Temkin A.G.: Obratnyje mietody tiepłoprowodnosti. Energija, Moskva 1973.
- [8] Pochoriler V.L.: Ispolzowanije mietoda sriedniej tiempieratury dle kontrola za rezimom progriewa dietalej parowych turbin. Tepłoenergetika 1969 nr 8, es. 82-90.
- [9] Tiermoprocnost dietalej maszin. Maszinostrojenije. Moskwa 1975, pod red. I.A. Birgera, B.F. Sorra.
- [10] Metody optymalizacji w języku FORTRAN. BNI, Warszawa 1984, pod red. J. Szymanowskiego.
- [11] Coulon J.J., Bocquaire H.: Essais de comportement des sondes de demarage C.E.M. Electricite de France F 329/74/036.

ЗОНД ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В РОТОРАХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

#### Резюме

В работе даны теоретические основы измерения термических напряжений в роторе турбины зондом укрепленным в корпусе турбины. Теоретические основы дают липь только общие указания, касающиеся конструкции зонда. В зависимости от конструкции ротора необходимо провести оптимизацию размеров зонда. Дан пример оптимизации размеров зонда для вращающегося валка, омываемого потоком воздуха.

PROBE FOR DIAGNOSING THERMAL STRESSES IN STEAM TURBINE WHEELS

#### Summary

Theoretical basis of the measurement of thermal stresses in a turbing wheel by means of a probe fixed to the turbine case has been given in the paper. The theoretical basis gives only general instructions concerning the probe desing. According to the wheel design, the probe dimensions optimizations should be carried out. The probe dimensions optimization for a rotating roll being flown round with air jet has been given as an example.