Seria: ENERGETYKA z. 76

Nr kol. 663

Gerard KOSMAN

PRZEBIEGI WYDŁUŻEŃ CIEPLNYCH TURBINY W STANACH NIEUSTALONYCH

> <u>Streszczenie</u>. Przeanalizowano przebiegi wydłużeń cieplnych wirnika względem kadłuba turbiny w różnych warunkach pracy. Przedstawiono wybrane rezultaty badań wydłużeń cieplnych dla turbiny ciepłowniczej i turbiny kondensacyjnej na parę mokrą. Zwrócono uwagę na zależność wydłużeń względnych od cech konstrukcyjnych, sposobu nagrzewania i położenia analizowanego przekroju turbiny,

Ważniejsze oznaczenia

- c ciepło właściwe,
- h_ izentropowy spadek entalpii pary,
- i entalpia pary,
- m strumień masy,
- N moc,
- 0 obwód,
- P pole przekroju poprzecznego,
- p ciśnienie,
- T temperatura,
- t czas,
- w wydłużenie bezwzględne,
- △w wydłużenie względne,
- z współrzędna w kierunku osi,
- 🕫 współczynnik wnikania ciepła,
- b współczynnik rozszerzalności cieplnej,
- e odkształcenie,
- 🖯 temperatura średnia,
- λ współczynnik przewodzenia ciepła,
- Q reakcyjność stopnia,
- 🤨 sprawność stopnia.

Wskaźniki

- k kadłub,
- w wirnik lub powierzchnia wewnętrzna,
- z powierzchnia zewnętrzna,
- 2 parametry pary za stopniem.

1. WSTEP

W czasie eksploatacji turbiny, na skutek różnicy temperatur wirnika i kadłuba, następuje zróżnicowanie wydłużeń cieplnych tych elementów i wzajemne ich przesunięcie. Prowadzi to do zmiany luzów osiowych ustawionych przy montażu w stanie zimnym.

Dla zapewnienia bezawaryjnej pracy turbiny nie można dopuścić do niebezpiecznego zmniejszenia się luzów osiowych w dowolnym przekroju układu łopatkowego i dławic. W związku z tym bardzo istotną sprawą jest znajomość przebiegów czasowych wydłużeń cieplnych turbiny w różnych warunkach nagrzewania.

W niniejszej pracy analizowano przebiegi czasowe wydłużeń względnych dwóch trubin (kondensacyjnej i ciepłowniczej), różniących się zdecydowanie stosunkami masy wirnika do masy kadłuba. Badano wpływ cech konstrukcyjnych oraz warunków nagrzewania na wartość wydłużeń względnych w różnych przekrojach poprzecznych turbiny.

2. NUMERYCZNE MODELOWANIE WYDŁUŻEN CIEPLNYCH TURBINY

Do opisu przemieszczeń poszczególnych punktów odkształcanego ciała w stosunku do konfiguracji początkowej (montaż, stan zimny) wprowadza się wektor przemieszczenia

$$\tilde{u} = \begin{bmatrix} u_x, u_y, u_z \end{bmatrix} = \tilde{u}(x, y, z, t)$$
(1)

związany z symetrycznym tensorem odkształcenia

$$\mathcal{E}_{ij} = \mathcal{E}_{ij}(x, y, z, t) \qquad i, j = x, y, z, \qquad (2)$$

związkami geometrycznymi

$$\mathcal{E}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) \qquad i, j = x, y, z.$$
(3)

Wydłużenia cieplne elementu są równe składowym wektora przemieszczenia w kierunku jego osi

$$w(x,y,z,t) = u_{x}(x,y,z,t).$$
 (4)

Z (3) i (4) wydłużenie cieplne części elementu o długości z jest równe

$$w(x,y,z,t) = \int_{0}^{\mathbb{Z}} \xi_{ZZ}(x,y,z,t) dz$$
 (5)

lub po zastosowaniu całkowania numerycznego

$$W = \sum_{i=1}^{n} \mathcal{E}_{zz_{i}}^{\Delta z_{i}}$$
 (6)

Jeżeli przyjąć, że dowolne przekroje poprzeczne elementu pozostaję po odkształceniu płaskie, to

$$k_{zz} = a(z) + b(z) + c(z)y$$
 (7)

lub po wyznaczeniu funkcji a, b i c z warunku równowagi sił i momentów [1]

$$\mathcal{E}_{zz} = \frac{P_{T}}{P} + \frac{x(B_{yT}I_{xx} - B_{xT}I_{xy}) + y(B_{xT}I_{yy} - B_{yT}I_{xy})}{I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^{2}},$$
 (3)

gdzie:

$$P_{T} = \iint_{P} \beta T dP, \quad I_{ij} = \iint_{P} ijdP, \quad B_{iT} = \iint_{\beta} i\beta T dP \quad (9)$$
$$i,j = x,y,z$$

Jeżeli przekrój elementu i pole temperatury są symetryczne względem x i y, to wzór (8) upraszcza się do postaci

$$\mathcal{E}_{zz} = \frac{P_{T}}{P} = \partial \theta \tag{10}$$

Tak postawione zagadnienie modelowania wydłużeń cieplnych analizowano bardzo szczegółowo w pracy [1]. W stosunku do dotychczasowych rozwięzań



Rys. 1. Różnicowy model geometryczny elementu turbiny

Załącznik

Równania różnicowe dla wyznaczenia średnich temperatur elementu (rys. 1)

| Lp. | Wzór |
|--------|--|
| | $\Theta_{1,k+1} = \Theta_{1,k} \left[1 - \Delta Fo(B_{W,1,k} + B_{Z,1,k} + B_{1,k} + \frac{1}{\Delta \xi} + \frac{1}{\Delta \xi^2}) \right] +$ |
| i = 0 | + $\frac{\Delta Fo}{\Delta \xi^2} \Theta_{2,k}$ + $Bi_{0,k} \frac{\Delta Fo}{\Delta \xi} T_{c,0,k}$ + |
| | + $\triangle FOB_{w,1,k}^{T}cw,1,k$ + $\triangle FOB_{z,1,k}^{T}cz,1,k$ |
| | $\Theta_{i,k+1} = \Theta_{i,k} \left[1 - \triangle Fo(B_{w,i,k} + B_{z,i,k} + \frac{2}{\Delta \leq 2}) \right] +$ |
| 1≥1 | $+ \triangle Fo(\frac{1}{\triangle \xi^2} - \frac{B_{p,i}}{2 \triangle \xi}) \ \mathfrak{B}_{i-1,k} + \triangle Fo(\frac{1}{\triangle \xi^2} - \frac{B_{p,i}}{2 \triangle \xi}) \ \mathfrak{B}_{i+1,k} + $ |
| | + $\triangle FoB_{w,1,k}^{T}cw,i,k$ + $\triangle FoB_{z,i,k}^{T}cz,i,k$ |
| | $\Theta_{n,k+1} = \Theta_{n,k} \left[1 - \triangle Fo(B_{w,n,k} + B_{z,n,k} + B_{1,k} \frac{1}{\Delta S} + \frac{1}{\Delta S^2}) \right] +$ |
| 1 = n | + $\frac{\Delta Fo}{\Delta \xi^2} \Theta_{n-1,k}$ + Bi _{1,k} $\frac{\Delta Fo}{\Delta \xi}$ T _{c,1,k} + |
| | + △F0 ^B o,n,k ^T cw,n,k + △ ^{F0B} z,n,k ^T cz,n,k |
| Oznacz | enia: $\triangle Fo = \frac{\Delta t}{c Q l^2}, \qquad \triangle \overset{\wedge}{\downarrow} = \frac{\Delta z}{l},$ |
| | $B_{p} = \frac{1}{P} \frac{dP}{dz} 1, \qquad B_{i} = \frac{O_{i} \alpha_{i}}{P_{\lambda}} 1^{2} (i = w, z)$ |

[np. 2,3,4,5] przyjęto bardziej ogólny model elementu (rys. 1). Srednią temperaturę w przekroju poprzecznym wyznaczono z równania

$$\frac{O_{w}\sigma_{w}}{P\lambda}(T_{cw} - \Theta) + \frac{O_{z}\sigma_{z}}{P\lambda}(T_{cz} - \Theta) + \frac{\partial^{2}\Theta}{\partial z^{2}} + \frac{1}{P}\frac{dP}{dz}\frac{\partial\Theta}{\partial z} = \frac{cQ}{\lambda}\frac{\partial\Theta}{\partial t}, \quad (11)$$

które rozwiązano metodą różnicową. Zasadę tworzenia modelu różnicowego pokazano na rys. 1. Analogi różnicowe równania (11) i warunków brzegowych podano w załączniku.

3. ANALIZA WYDŁUŻEN CIEPLNYCH TURBINY DLA ELEKTROWNI JADROWEJ

Analizujemy wydłużenia cieplne elementów turbiny w nieustalonych warunkach pracy po skokowej zmianie obciążenia z m/m_o = 0,3 do m/m_o = 1 (obciążenie nominalne). Jako przypadek graniczny rozpatrywanego zagadnienia otrzymujemy wydłużenia dla stanu ustalonego, przy mocy znamionowej turbiny. Dodatkowo analizujemy wydłużenia przy obciążeniu częściowym turbiny.

Rozważania szczegółowe dotyczą części wysokoprężnej turbiny dużej mocy dla elektrowni jędrowej. Turbina jest zasilana parę o parametrach: ciśnienie p_o = 4,3 2 MPa, stopień suchości x_o = 0,995, entalpia i_o = 2789 kJ/kg. Strumień masy pary przy obciążeniu nominalnym m_{o} = 373 kg/s.Układ przepływowy części WP składa się ze stopnia regulacyjnego (jednowieńcowego) oraz 5 stopni akcyjnych o niewielkiej reakcyjności. Kadłub wykonany jest jako jednopowłokowy. Wirnik jest tarczowy pełnokuty.

Wybrane wyniki obliczeń cieplno-przepływowych części WP turbiny przy obciążeniu nominalnym zebrano w tablicy 1 [6]. Rozkład parametrów pary w turbinie przy obciążeniu częściowym $\dot{m}/\dot{m}_{o} = 0.3$ podano w tablicy 2.

Tablica 1

| Lp. | Nr stopnia | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | ŵ | kg/s | 372,6 | 356,0 | 317,0 | 286,3 | 282,7 | 267,4 |
| 2 | P2 | MPa | 2,66 | 1,85 | 1,23 | 0,79 | 0,48 | 0,28 |
| 3 | 12 | kJ/kg | 2730 | 2691 | 2655 | 2623 | 2587 | 2555 |
| 4 | ×2 | - | 0,960 | 0,945 | 0,935 | 0,929 | 0,925 | 0,922 |
| 5 | T ₂ | °c | 227,3 | 208,4 | 189,2 | 169,0 | 149,5 | 131,2 |
| 6 | h | kJ/kg | 84,77 | 68,32 | 74,16 | 78,00 | 87,10 | 87,28 |
| 7 | u/C1 | - | 0,484 | 0,539 | 0,521 | 0,523 | 0,514 | 0,537 |
| 8 | Q . | - | 0,10 | 0,17 | 0,20 | 0,24 | 0,28 | 0,32 |
| 9 | 2 | % | 68,5 | 80,7 | 79,1 | 77,6 | 75,7 | 74,2 |
| 10 | N | NW | 21,81 | 18,93 | 18,24 | 16,98 | 18,49 | 17,50 |
| | | | | | | | | |

Wybrane wyniki obliczeń cieplno-przepływowych części WP turbiny obciężeniu nominalnym

Tablica 2

| Lp. | Nr stopnia | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | |
|-----|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|
| 1 | ni kg/s | 113,6 | 108,4 | 96,8 | 87,1 | 85,9 | 82,5 | | | |
| 2 | P₂ MPa | 0,795 | 0,550 | 0,367 | 0,237 | 0,144 | 0,071 | | | |
| 3 | 1 ₂ kJ/kg | 2706 | 2665 | 2624 | 2585 | 2542 | 2487 | | | |
| 4 | T ₂ °C | 170,1 | 155,3 | 140,5 | 125,6 | 110,1 | 90,5 | | | |

Rozkład parametrów pary w części WP turbiny przy obciążeniu częściowym (m/m w 0,3)



Rys. 2. Wydłużenia cieplne dla stanu ustalonego przy obciążeniu nominalnym i częściowym



77



Rys. 5. Wydłużenia względne wirnik-kadłub



Rys. 6. Przebiegi czasowe wydłużeń względnych w kilku punktach turbiny

Obliczenia rozkładu średniej temperatury w kadłubie i wirniku przeprowadzono w oparciu o zależności podane w załączniku. Wydłużenia cieplne wyznaczono ze wzoru (6). Obliczenia wykonano dla następujących stałych materiałowych, uśrednionych w badanym zakresie temperatur: kadłub $\beta =$ = 0,011 . 10⁻³ 1/K, c = 514 J/kg K, $\lambda =$ 50 W/mK, Q = 7850 kg/m³,wirnik $\beta = 0,014 \cdot 10^{-3}$ 1/K, c = 502 J/kgK, $\lambda =$ 39 W/mk. Współczynniki wnikania ciepła określono na podstawie pracy [7].

Przyjęto, że wszystkie elementy wirnika i kadłuba turbiny z WP mają w warunkach montażowych (stan zimny) jednakową temperaturę, równą 25⁰C.

Wyniki obliczeń wydłużeń cieplnych dla stanu ustalonego przedstawiono na rys. 2. Wykreślono wydłużenia bezwzględne kadłuba i wirnika oraz wydłużenia względne przy obciążeniu nominalnym i częściowym (m/m_ = 0,3).

Wyniki obliczeń wydłużeń dla stanu nieustalonego zebrano na rys. 3-6. Rys. 3 ilustruje nieustalone wydłużenia cieplne wirnika w czasie przejścia od stanu m/m = 0.3 do obciężenia nominalnego. Wydłużenia cieplne kadłuba przedstawiono na rys. 4. Z porównania tych przebiegów wynika,że lekki wirnik nagrzewa się szybciej niż kadłub. Wirnik osięga stan ustalony po około 1 godz. nagrzewania. Czas nagrzewania kadłuba jest prawie dwukrotnie dłuższy.

Rezultaty obliczeń podane na rys. 3 i 4 wykorzystano do opracowania przebiegów czasowych wydłużeń względnych (rys. 5 i 6). Postać przebiegów wydłużeń względnych zależy od położenia analizowanego przekroju poprzecznego turbiny (rys. 6).

4. Przebiegi wydłużeń cieplnych turbiny ciepłowniczej

Przedmiotem rozważań jest jednokadłubowa turbina ciepłownicza 13UC100 produkcji ZAMECHu (rys. 7). Turbina jest zasilana parą o ciśnieniu 13 MPa i temperaturze 535⁰C. Kadłub w części WP jest dwupowłokowy. Kadłub wewnętrzny wykonany jest bez kołnierzy i łączony za pomocą pierścieni skurczowych według rozwiązania BBC. Wirnik jest tarczowy pełnokuty.

Analizujemy rozkłady temperatury w przekroju podłużnym oraz wydłużenia cieplne wirnika, kadłuba wewnętrznego i zewnętrznego turbiny w nieustalonych warunkach pracy, dla rzeczywistych warunków nagrzewania ze stanu zimnego, określonych charakterystykami rozruchowymi [8]. Podobną analizę,przy założeniu skokowej zmiany temperatury i strumienia masy pary do wartości nominalnych, przeprowadzono w pracy [1]. Uzyskane tam rezultaty dają pogląd na najbardziej niekorzystne stany wydłużeń. W rzeczywistości intensywność nagrzewania jest mniejsza i w związku z tym należy się spodziewać innego przebiegu czasowego wydłużeń bezwzględnych i względnych.

W obliczeniach wykorzystano modele geometryczne wirnika i kadłubów, opracowane w [1]. Zmieniono jedynie warunki brzegowe, dobierając parametry pary na podstawie [8]. Temperatury i wydłużenia cieplne wyznaczono w oparciu o algorytmy omówione w punkcie 2. Wyniki obliczeń przedstawiono na (rys. 8, 9 i 10). Wyznaczono przebiegi czasowe wydłużeń wirnika w stosunku do kadłuba zewnętrznego (rys. 8 i 8) oraz przebiegi wydłużeń wirnika względme kadłuba wewnętrznego (rys. 10)

5. UWAGI KOŃCOWE

Porównanie uzyskanych rezultatów dla badanej trubiny ciepłowniczej i kondensacyjnej wskazuje na znaczne różnice w przebiegach czasowych wydłużeń cieplnych tych turbin.

Badana turbina kondensacyjna charakteryzuje się lekkim wirnikiem i bardziej masywnym kadłubem. W związku z tym wirnik nagrzewa się szybciej od kadłuba. Wydłużenia względne (△w = w_w - w_w) przymmują wartości ujemne.Ich





Rys. 8. Wydłużenie względne wirnik-kadłub zewnętrzny







wartość bezwzględna w miarę nagrzewania się kadłuba maleje (rys. 6). Dla stanu ustalonego wydłużenia wirnika są większe od wydłużeń kadłuba.

Wartość wydłużeń względnych w dowolnej chwili czasowej zależy od miejsca. W miarę oddalania się od łożyska oporowo-nośnego różnice 🛆 w są coraz większe.

Badana turbina ciepłownicza charakteryzuje się lekkimi kadłubami i bardzo grubym wirnikiem. Przebiegi czasowe wydłużeń względnych są jakościowo i ilościowo różne od poprzednich. W początkowym okresie kadłub nagrzewa się szybciej niż wirnik i stąd wydłużenia względne są dodatnie. Po dłuższym nagrzewaniu sytuacja ulega zmianie. W związku z tym △ w zmienia nie tylko wartość liczbową ale i znak (rys. 9 i 10).

Ciekawie wygląda sprawa porównania przebiegów wydłużeń względnych dla dwóch różnych sposobów nagrzewania. Na rys. 8, 9 i 10 porównano wydłużenia dla skokowej zmiany parametrów pary i rozruchu według charakterystyk rozruchowych. W przypadku skokowej zmiany parametrów pary intensywność nagrzewania jest większa, elementy nagrzewają się szybciej. Przebiegi czasowe wydłużeń względnych są bardziej dynamiczne. Wydłużenia cieplne dla stanu ustalonego, przy obciążeniu nominalnym, są oczywiście takie same dla różnych warunków nagrzewania.

LITERATURA

- Kosman G.: Ocena nieustalonych obciążeń cieplnych oraz dobór warunków nagrzewania turbin parowych. ZN Pol. Sl. Energetyka z. 75, 1979.
- [2] Bierdinskij A.A.: Rasczety udlinienij w turbinie PWK-200-1.Eniergomaszinostrojenije nr 6, 1966.
- [3] Orłowski Z.: Wydłużenia względne trubiny typu 13K215 podczas rozruchu. Energetyka nr 3, 1976.
- [4] Bogatyrenko K.I., Ilczenko O.T., Prokofiew W.E.: Opriedielenije na AMM udlinienij i wzaimnych pieriemieszczenij rotora i korpusa parowoj turbiny. Eniergieticzeskoje maszinostrojenije, wypusk 13, 1972.
- [5] Kapinos W.M. i inni: Rasczet tiempieraturnogo udlinienija rotora i korpusa parowoj turbiny w niestacjonarnych reżimach. Eniergieticzeskoje maszinostrojenije, wypusk 20, 1975.
- [6] Miller A., Lewandowski J., Grunwald B.: Model kompleksowy dynamiki turbiny dla elektrowni jądrowej. Opracowanie ITC PW, Warszawa 1977.
- [7] Chmielniak T., Kosman G.: Katalog współczynników wnikania ciepła dla elementów turibn. Praca naukowo-badawcza, Gliwice 1974.
- [8] Cieplne krzywe rozruchowe turbozespołu ciepłowniczego i przemysłowego. Praca ZAMECHu nr 8057289, Elbląg 1969.

84

ПРОБЕГИ ТЕПЛОВЫХ УДЛИНЕНИЙ ТУРБИНЫ В НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ

Резюме

В статье производится анализ пробега тепловых удиннений ротора относительно корпуса турбины в разных работы.

Приводятся избранные результаты исследований тепловых удлинений для теплофикационной и кондепсационной турбин на мокрый пар. Обращается внимание на зависимость относительных удлинений от конструкционных признаков способа нагрева и расположения анализированного сечения турбины.

THE PROCESS OF THE HEAT EXTENSION OF TURBINE IN TRANSIENT STATES

Summary

The process of the heat extension of the rotor with respect to the turbine frame at different operating conditions were analysed.

The selected research results of heat extension of the heat and wet steam condensation turbine are presented. It has been pointed out to the dependency of relative extensions on the desing features, method of heating and the position of the turbine section under study.