

WPŁYW MIMOŚRODOWEGO PRZEMIESZCZENIA WAŁU WZGLĘDEM KORPUSU NA WYMUSZENIA AERODYNAMICZNE GENEROWANE W USZCZELNIENIU NADBANDAŻOWYM WIRNIKA TURBINOWEGO CZĘŚĆ III: SIŁY I MOMENTY

Krzysztof KOSOWSKI i Marian PIWOWARSKI

POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ OCEANOTECHNIKI I OKRĘTOWNICTWA
Katedra Automatyki Okrętowej i Napędów Turbinowych
ul G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk
Tel: (+58) 347 19 16, (+58) 347 22 35, Fax: (+58) 341 47 12
email: kosowski@pg.gda.pl, piwom@pg.gda.pl

Streszczenie

Zagadnienia poruszone w pracy dotyczą badań eksperymentalnych wymuszeń aerodynamicznych generowanych w uszczelnieniach nadbandażowych stopni turbinowych. W pierwszej części referatu opisano stanowisko doświadczalne, a w drugiej przedstawiono pomierzone rozkłady ciśnień w uszczelnieniu nadbandażowym stopnia turbiny modelowej. W części III przedstawiono zagadnienie wpływu mimośrodowego przemieszczenia osi wirnika względem osi korpusu na siły ciśnieniowe i pochodzące od nich momenty, które działają na wirnik turbinowy i mogą prowadzić o drgań samowzbudnych typu aerodynamicznego.

Słowa kluczowe: dynamika wirników, drgania samowzbudne

THE INFLUENCE OF ROTOR SPEED ON THE AERODYNAMIC FORCES GENERATED IN THE SHROUD CLEARANCE OF A TURBINE STAGE PART III: AERODYNAMIC FORCES AND MOMENTS

Summary

The experimental investigations into the forces and moments generated in the shroud clearance were performed on a one-stage air model turbine of impulse type. Basing on the pressure distribution, the aerodynamic forces and moments were calculated as a function the rotor eccentricity. The results show the influence of the rotor-stator eccentricity on the aerodynamic forces and moments generated in shroud clearances. Although the axial component of the pressure force is relatively low, the moments exerted by this force should be take into account when total aerodynamic moments are determined.

Keywords: rotor dynamics, self-excited vibrations

1. WPROWADZENIE

Mimośrodowe położenie korpusu względem wirnika zmienia wielkość szczeliny w uszczelnieniu stopnia, co wpływa na parametry przepływu w uszczelnieniu, w tym na rozkład ciśnienia. Niesymetryczny rozkład ciśnienia w szczelinie między korpusem i bandażem palisady wirnikowej (także w dławnicach) generuje tzw. siły ciśnieniowe. Siły te oraz momenty nimi spowodowane stanowią składnik wymuszeń aerodynamicznych działających na wirnik turbiny. Siły ciśnieniowe, zależne od rozkładu ciśnień w szczelinie nadbandażowej, mogą być określone wstępnie jako funkcja typu uszczelnienia, wymiarów bandaża, osiowych i promieniowych luzów. Ciśnienie w szczelinie działa na całą powierzchnię bandaża zarówno

w kierunku promieniowym, jak i osiowym. Kierunek wypadkowych sił ciśnieniowych zależy od kierunku przemieszczenia wirnika, od prędkości zawirowania strugi czynnika, a także od przepływu przecieków w uszczelnieniu. Zwykle charakterystyki uszczelnienia są określane w formie współczynników dynamicznych uszczelnienia i mogą być zapisane w formie równania:

$$-\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_x \\ M_y \end{bmatrix} = [\mathbf{K}]^* \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \Phi_x \\ \Phi_y \end{bmatrix} + [\mathbf{C}]^* \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\Phi}_x \\ \dot{\Phi}_y \end{bmatrix} + [\mathbf{M}]^* \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\Phi}_x \\ \ddot{\Phi}_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie: X, Y, Φ_x, Φ_y - przemieszczenia oraz kąty skośnego ustawienia osi wirnika względem osi korpusu w kierunku poziomym i pionowym,

F_x , F_y , M_y , M_x - odpowiednio składowe siły i momenty aerodynamiczne,
 M , C oraz K - macierze zwane odpowiednio macierzami współczynników „inercji”, „tłumienia” oraz „sztywności”.

Takie podejście między innymi prezentują Childs (1983), Dietzen and Nordmann (1987), Childs and Scharrer (1988), Nelson and Nguyen (1988a, 1988b), Baskharone and Hensel (1991), Simon and Ferne (1992), Kanemori and Iwatsubo (1992, 1994), Marguette and Childs (1996), Marguette et al (1997), Darden et al (1999).

Znając wyznaczony eksperymentalnie rozkład ciśnienia nad bandażem (patrz. II część referatu) oraz geometrię i wymiary bandaża można wyznaczyć siły pochodzące od ciśnienia i poddawać je analizie wpływu poszczególnych parametrów. Siły i momenty przedstawiono w układzie współrzędnych pokazanym na rysunku 1. Wszystkie prezentowane w tej pracy siły, momenty oraz ich składowe odnoszą się do tego układu.

Elementarna siła F_i (Rys.1b) działająca promieniowo na elementarną powierzchnię nie wywołuje momentu względem osi Z, a jej składowa F_{yi} oddziałuje momentem M_{YXi} względem osi X, a składowa F_{xi} powoduje moment M_{Xyi} względem osi Y:

$$M_{YXi} = F_{yi} \cdot z \quad (2)$$

$$M_{Xyi} = F_{xi} \cdot z \quad (3)$$

Maksymalna długość ramienia z jest równa połowie szerokości bandaża.

Elementarna siła F_{zi} (Rys.1c) działa w kierunku osiowym i generuje moment M_{ZXi} względem osi X i moment M_{Zyi} względem osi Y:

$$M_{ZXi} = F_{zi} \cdot r \cdot \sin\beta \quad (4)$$

$$M_{Zyi} = F_{zi} \cdot r \cdot \cos\beta \quad (5)$$

Maksymalna długość ramienia jest w tym przypadku równa promieniowi bandaża.

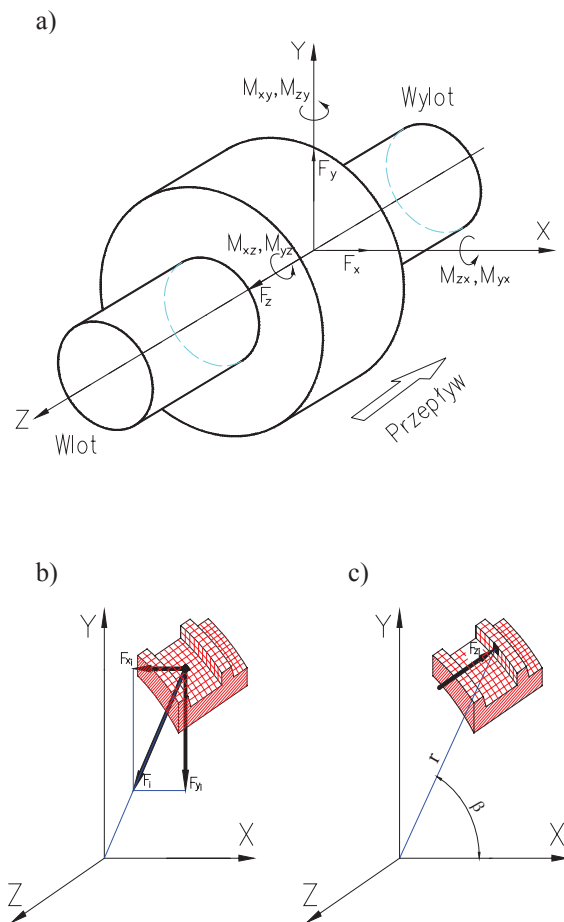
Wypadkowy moment względem osi X jest równy sumie momentów względem osi X pochodzących od elementarnych sił F_{yi} i F_{zi} :

$$M_X = \sum M_{YXi} + \sum M_{ZXi} \quad (6)$$

Wypadkowy moment względem osi Y jest równy sumie momentów względem osi Y pochodzących od elementarnych sił F_{xi} i F_{zi} :

$$M_Y = \sum M_{Xyi} + \sum M_{Zyi} \quad (7)$$

Sumaryczne siły działające w kierunkach X, Y, oznaczono odpowiednio przez F_x , F_y i F_z . Przedstawione w tej pracy siły i momenty zostały wyznaczone w oparciu o uśrednione czasowe rozkłady ciśnienia w szczelinie nadbandażowej.



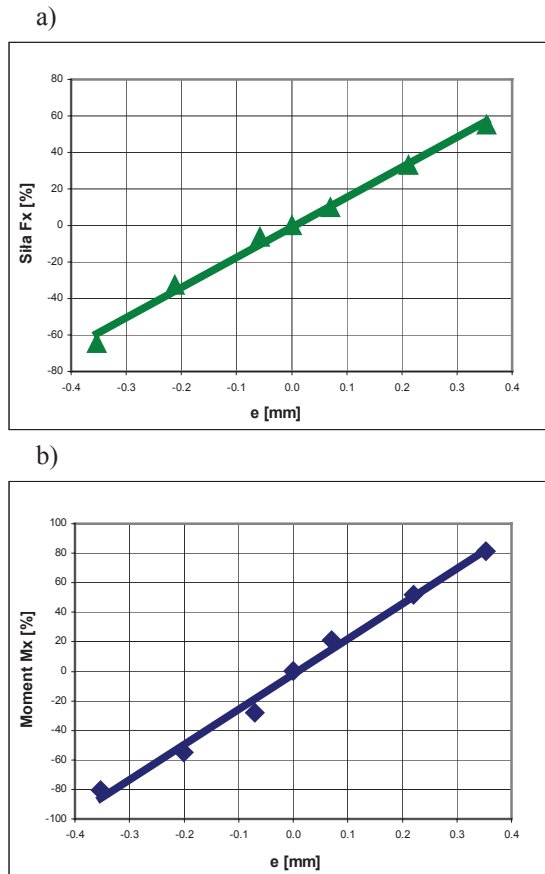
Rys.1. Układ współrzędnych do wyznaczania sił i momentów

2. WPŁYW MIMOŚRODOWOŚCI NA SIŁY CIŚNIENIOWE I MOMENTY

Przedstawione na rysunkach w tej części pracy składowe F_x , F_y , F_z siły ciśnieniowej F odniesiono do maksymalnej sumarycznej siły wypadkowej określanej wzorem:

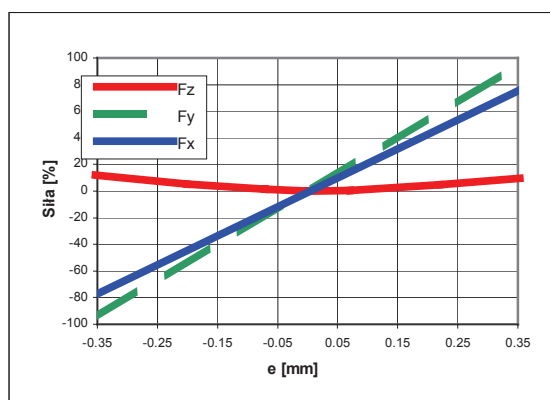
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (8)$$

Natomiast momenty M_x , oraz M_y odniesione zostały do maksymalnego momentu spośród całego zakresu pomiarowego w danej serii. Z kolei momenty M_{zx} , M_{zy} określają udział momentów od siły F_z w sumarycznym momencie odpowiednio względem osi X i Y. Przykład sił i momentów w funkcji mimośrodowego ustawienia wirnika względem korpusu (obliczonych na podstawie rozkładów ciśnień w uszczelnieniu) jest zaprezentowany na rysunku 2. Różnica między wartością obliczoną a wartością określoną linią trendu nie przekracza 10% w całym zakresie badań. Dla przejrzystości rysunków pominięto punkty na dalszych wykresach zaprezentowanych w pracy, a przedstawiono linie trendu.



Rys. 2. Przykładowy rozkład punktów wokół linii dla sił aerodynamicznych (a) oraz dla momentów aerodynamicznych (b) ($n=4200\text{obr/min}$, $m=0,43\text{kg/s}$)

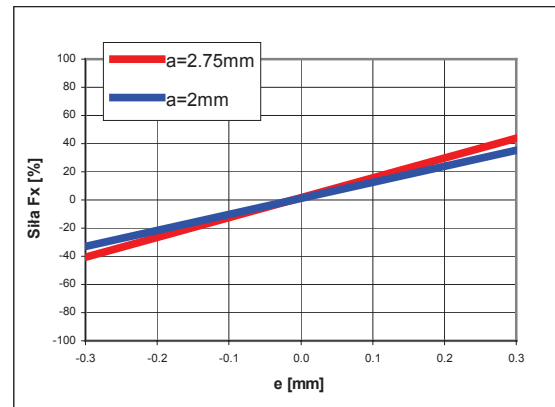
Zamieszczone poniżej wykresy odpowiadają parametrom pracy turbiny przytoczonym w II części referatu: częstość obrotów wirnika $n = 5300\text{ obr/min}$, strumień masy powietrza na wlocie do turbiny $m = 0,63\text{ kg/s}$, moc teoretyczna turbiny $N=20,8\text{kW}$.



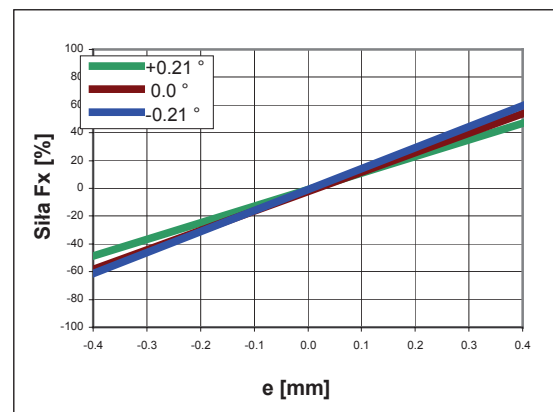
Rys. 3. Wykres sumarycznych sił aerodynamicznych F_x , F_y , F_z w funkcji mimośrodowego położenia wirnika względem korpusu e (siły odniesione do

maksymalnej sumarycznej siły wypadkowej, określonej dla $e=-0,35\text{mm}$ i $n=5300\text{obr/min}$)

Na rys.3 przedstawiono wpływ mimośrodowego położenia wirnika względem korpusu na wartości sumarycznych sił aerodynamicznych F_x , F_y , F_z . Dla porównania na rysunkach 4 i 5 pokazano, oprócz wpływu mimośradowości, także wpływ luzu osiowego i skośnego położenia osi wirnika względem osi korpusu na sumaryczną składową F_x .



Rys. 4. Sumaryczna siła aerodynamiczna F_x w funkcji mimośrodowego położenia wirnika względem korpusu e oraz przy stałej częstości obrotowej $n=5300\text{obr/min}$ i przy różnym luzie osiowym a (odniesiona do maksymalnej sumarycznej siły wypadkowej, określonej dla $e=-0,35\text{mm}$ i $a=2\text{mm}$)

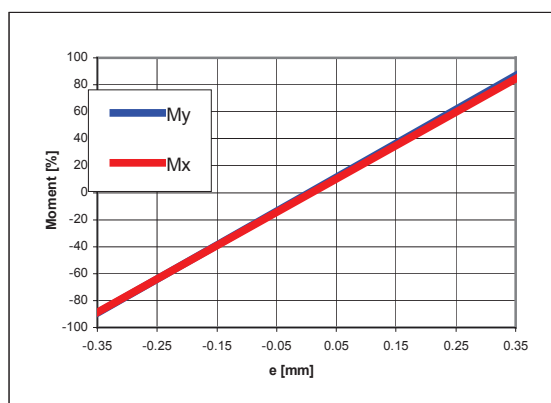


Rys. 5. Sumarycznych siła aerodynamiczna F_x w funkcji mimośrodowego położenia wirnika względem korpusu e dla różnego skośnego położenia φ osi wirnika względem osi korpusu przy stałej częstości obrotowej $n=5300\text{obr/min}$ (odniesiona do maksymalnej sumarycznej siły wypadkowej, określonej dla $e=+0,45\text{mm}$ i $\varphi=+0,21^\circ$)

Na podstawie uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że największy wpływ na wielkość sił aerodynamicznych ma zmiana mimośrodowego ustawienia wirnika względem korpusu. Zmiana

położenia minimalnej szczeliny między korpusem a wirnikiem o 180° powoduje zmianę kierunku działania sił F_X oraz F_Y . Z kolei zmiana wartości luzu osiowego w niewielkim stopniu wpływa na zmianę sił aerodynamicznych (w badanym przedziale zmiany luzu osiowego przedziale od $a=2$ mm do $a=2.75$ mm). Zmiana skośnego ustawienia wirnika względem korpusu w pewnym stopniu wpływa na wielkość sił F_X oraz F_Y , natomiast wpływa wyraźnie na zmianę kierunku działania siły osiowej F_Z . Składowa osiowa F_Z jest relatywnie mała w porównaniu do składowych F_X oraz F_Y i dlatego zwykle nie jest ujmowana w równaniach współczynników dynamicznych uszczelnienia.

Na rysunkach 6 i 7 zaprezentowane zostały wykresy momentów aerodynamicznych M_X , M_Y , M_{ZX} , M_{ZY} działających na wirnik. Moment M_X jest sumarycznym momentem działającym na wirnik względem osi X pochodzącym od sił F_Y oraz F_Z . Natomiast moment M_Y jest sumą momentów działających na wirnik względem osi Y pochodzących od sił F_X oraz F_Z . Z kolei momenty M_{ZX} , M_{ZY} określają udział momentów od siły F_Z w sumarycznym momencie względem osi X i Y.



Rys. 6. Wykres sumarycznych momentów aerodynamicznych M_X , M_Y w funkcji mimośrodowego położenia wirnika względem korpusu e (odniesione do maksymalnego momentu sumarycznego M_X , określonego dla $e=-0.4$ mm i $n=5300$ obr/min)

Należy podkreślić fakt liniowej zależności zarówno sił, jak i momentów aerodynamicznych, od mimośrodowego przemieszczenia wirnika względem korpusu. Zgodnie z uzyskanymi wynikami można wysunąć wniosek, że największy wpływ na zmianę momentów aerodynamicznych generowanych w uszczelnieniu nadbandażowym ma zmiana szczeliny na skutek mimośrodowego przemieszczenia wirnika względem korpusu. Pewną rolę odgrywa również zmiana skośnego ustawienia osi wirnika względem osi korpusu, podczas gdy wpływ zmiany luzu osiowego jest bardzo słabo widoczny. O ile w równaniach charakterystyk uszczelnienia można pominąć składową osiową siły

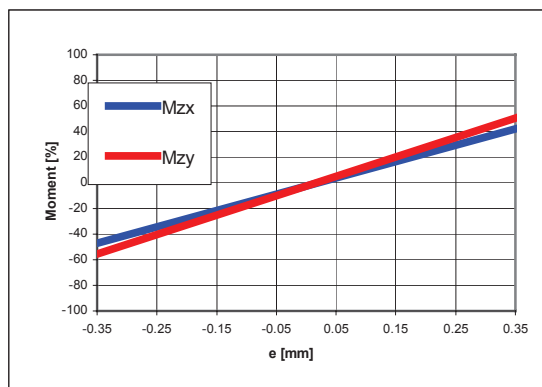
F_Z jako małą w porównaniu ze składowymi F_X oraz F_Y , to momenty od siły F_Z powinny być uwzględniane ze względu na duży ich udział w momencie sumarycznym. Zatem należałoby zmodyfikować charakterystyki uszczelnienia (1) i posługiwać się równaniem uwzględniającym siłę osiową:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_y \\ M_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_z \\ C_x \\ C_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \Phi_x \\ \Phi_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_z \\ C_z \\ C_z \\ C_z \\ C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\Phi}_x \\ \dot{\Phi}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_z \\ M_z \\ M_z \\ M_z \\ M_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\Phi}_x \\ \ddot{\Phi}_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

lub w przypadku jej pominięcia:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_y \\ M_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_x \\ K_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \Phi_x \\ \Phi_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_z \\ C_z \\ C_z \\ C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\Phi}_x \\ \dot{\Phi}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_z \\ M_z \\ M_z \\ M_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\Phi}_x \\ \ddot{\Phi}_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

gdzie: macierze współczynników M_Z , C_Z oraz K_Z należy uzależnić od składowej osiowej F_Z , która ma znaczny udział w sumarycznych momentach M_X i M_Y .



Rys. 7. Wykres sumarycznych momentów aerodynamicznych M_{ZX} , M_{ZY} w funkcji mimośrodowego położenia wirnika względem korpusu e (odniesione do maksymalnych momentów sumarycznych odpowiednio M_X oraz M_Y , określonych dla $e=-0.4$ mm i $n=5300$ obr/min)

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania wykazały, że:

- 1). W przypadku labiryntowego, promieniowego uszczelnienia nadbandażowego decydujący wpływ na rozkład ciśnień, a przez to na rozkład i wartości generowanych sił aerodynamicznych ma zmiana luzu promieniowego i skośne przemieszczenie osi wirnika względem osi korpusu, a zmiana luzu osiowego odgrywa znacznie mniejszą rolę.
- 2). Występuje znaczny wpływ zmiany mimośrodowego położenia tarczy kierowniczej względem wirnikowej na rozkład i poziom ciśnień

w uszczelnieniu nadbandażowym. Zmiana mimośrodowego położenia tarczy kierowniczej względem wirnikowej pociąga za sobą zmianę geometrii szczeliny nadbandażowej, co powoduje wyraźną zmianę rozkładu i wartości ciśnienia w uszczelnieniu. Wyraźnie widać przemieszczenie o 180° obszaru wysokich ciśnień wraz ze zmianą znaku mimośrodowego przemieszczenia wirnika względem korpusu. Zmiana mimośrodowego ustawienia wirnika względem korpusu wyraźnie wpływa na wartości sił i momentów aerodynamicznych.

3). Stosunkowo mała wartość składowej osiowej siły ciśnieniowej może generować momenty o znacznej wartości w porównaniu z momentami pochodzącymi od pozostałych sił składowych.

Wobec tego stwierdzenia proponuje się zmodyfikowanie metody współczynników dynamicznych dla wyznaczenia sił i momentów aerodynamicznych generowanych przez uszczelnienie nadbandażowe, by uwzględnić w macierzach współczynników wpływ składowej siły osiowej na generowane momenty sumaryczne.

4. LITERATURA

- [1] Baskharone E. A., Hensel S. J. „*A Finite-Element Perturbation Approach to Fluid/Rotor Interaction in Turbomachinery Elements. Part 1: Theory*” *Part 2: Application*” Transactions of the ASME Journal of Fluids Engineering September 1991, Vol 113
- [2] Childs D. W. „*Finite-length Solutions for Rotordynamic Coefficients of Turbulent Annular Seals*” Transactions of the ASME Journal of Lubrication Technology July 1983, Vol 105
- [3] Childs D. W., Scharrer J. K. „*Theory Versus Experiment for the Rotordynamic Coefficient of Labyrinth Gas Seals: Part II-A Comparison to Experiment*” Transactions of the ASME Journal of Vibration, Acoustic, Stress, and Reliability in Design July 1988, Vol 110
- [4] Darden M. J., Earhart E. M., Flowers G. T. „*Experimental Rotordynamic Characterization of Annular Seals: Facility and Methodology*” Transactions of the ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, April 1999
- [5] Dietzen F. J., Nordmann R. „*Calculating Rotordynamic Coefficients of Seals by Finite Difference Techniques*” Transactions of the ASME Journal of Turbomachinery July 1987, Vol 109
- [6] Kanemori Y., Iwatsubo T. „*Experimental Study of Dynamic Fluid Forces and Moments for a Long Annular Seal*” Transactions of the ASME Journal of Tribology October 1992, Vol 114
- [7] Kanemori Y., Iwatsubo T. „*Forces and Moments Due to Combined Motion of Conical and Cylindrical Whirls for a Long Seal*” Transactions of the ASME Journal of Tribology July 1994, Vol 116
- [8] Nelson C. C., Nquyen D. T. „*Analysis of Eccentric Annular Seals: Part 1-A New Solution Using Fast Fourier Transforms for Determining Hydrodynamic Force*” Transactions of the ASME Journal of Tribology April 1988, Vol 110
- [9] Marquette O. R., Childs D. W. „*An Extended Three - Control - Volume Theory for Circumferentially - Grooved Liquid Seals*” Transactions of the ASME Journal of Tribology April 1996, Vol 118
- [10] Marquette O. R., Childs D. W., San Andres L. „*Eccentricity Effects on the Rotordynamic Coefficients of Plain Annular Seals: Theory Versus Experiment*” Transactions of the ASME Journal of Tribology July 1997, Vol 119
- [11] Nelson C. C., Nquyen D. T. „*Analysis of Eccentric Annular Seals: Part 2-Effects of Eccentricity on Rotordynamic Coefficients*” Transactions of the ASME Journal of Tribology April 1988, Vol 110
- [12] Simon F., Frêne J. „*Analysis for Incompressible Flow in Pressure Seal*” Transactions of the ASME Journal of Tribology July 1992, Vol 114