

## NIEPEWNOŚĆ DANYCH WEJŚCIOWYCH DOTYCZĄCYCH OBCIĄŻEŃ W MODELOWANIU UKŁADÓW WIRNIKOWYCH

Paweł PIETKIEWICZ

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn  
10-957 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 11/132, 89 523 45 14, [papiet@uwm.edu.pl](mailto:papiet@uwm.edu.pl)

### Streszczenie

W artykule przedstawiono ideę uwzględnienia niepewności danych wejściowych w modelowaniu układów wirnik-łożyska w maszynach wirnikowych. Przedstawione zostały wybrane rezultaty obliczeń przy zastosowaniu dwóch różnych algorytmów generowania losowego przebiegu zmienności siły poprzecznej obciążającej wał wirnika. Wyniki wstępnych badań numerycznych pozwalają na potwierdzenie przydatności wykorzystywanych narzędzi, jednak sygnalizują także występujące trudności w interpretacji otrzymywanych tą drogą odpowiedzi analizowanych układów.

Słowa kluczowe: wirnik, niepewność danych, trajektoria, drgania, układ wirnik-łożyska.

### THE INPUT DATA UNCERTAINTY CONCERNING LOADS IN THE ROTOR SYSTEM MODELLING

#### Summary

The idea of the allowance method for the input data uncertainties in the turbo-machines rotor-bearings systems modelling are contained in the paper. The author presents selected calculation results, when two different generation algorithms of the random variability course of the shear force, that imposes the rotor shaft loading, have been applied. The initial numerical research results displayed in this paper allow for acknowledge of such tools' kind usability, however they also signal the difficulties occurring in the interpretation of the analysed systems answers, received this way.

Keywords: rotor, data uncertainty, trajectory, vibrations, rotor-bearings system.

### 1. WSTĘP

Zastosowanie metod numerycznych pozwala na przeprowadzanie eksperymentów, które nie byłyby możliwe na obiektach rzeczywistych uznanych za krytyczne (np. wielkogabarytowe maszyny wirnikowe). Istota działania wszelkich rozwiązań opartych na komputerach ogranicza jednak możliwości uwzględnienia uwarunkowań występujących w naturze. Podczas pomiarów wartości sygnałów w każdym eksperymencie wykonywanym na obiekcie rzeczywistym, występują nie tylko z tzw. szumy oraz rozbieżności powodowane błędami pomiarowymi, ale również przypadkowość, która powoduje losowe (w pewnym zakresie) zmiany czynników wejściowych, mających wpływ na wyniki eksperymentu.

Zastosowanie numerycznych metod obliczeniowych, dając z jednej strony bezpieczeństwo w wykonywaniu wszelkich eksperymentów, jednocześnie powoduje otrzymywanie dyskretnych, zdeterminowanych wyników badań, które z każdym powtórzeniem eksperymentu nie zmieniają się. Podczas realizacji przedsięwzięć badawczych, mając do czynienia z wieloma danymi wejściowymi do modelu obiektu

technicznego oraz przy braku uwzględnienia niepewności większości z tych danych, należy liczyć się z poważnymi rozbieżnościami otrzymywanych wyników w porównaniu z ewentualnym eksperymentem wykonanym na obiekcie rzeczywistym.

Autor niniejszego artykułu zastosował do badań numerycznych prosty algorytm, zawierający elementy losowej zmiany wartości siły poprzecznej obciążającej dwupodporowy wirnik oparty na dwóch podporach, należącej do zbioru danych wejściowych w sprawdzonym modelu.

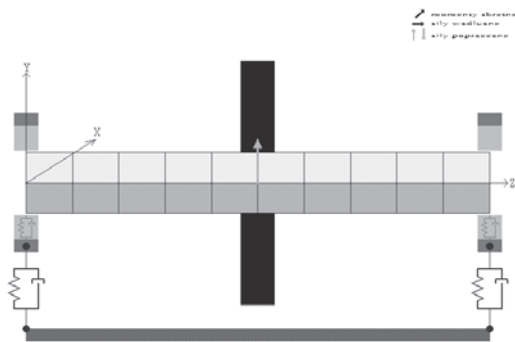
### 2. OBIEKT BADAŃ I NARZĘDZIA BADAWCZE

Obiektem badań był wirnik dwupodporowy o symetrycznej budowie i masie  $m \approx 179$  kg. W jego osi symetrii umieszczono dysk do którego przyłożono siłę poprzeczną o wartości  $P = 500$  N.

W modelu wirnika (rys. 1) wyodrębniono 15 węzłów. Przykładana siła poprzeczna umiejscowiona została w węźle 8, przez który przechodzi oś symetrii wirnika oraz, w którym umieszczono dysk.

Do badań zastosowano opracowany w IMP PAN program komputerowy „NLDW-75”, służący do obliczeń sprężonych form drgań giętno-wzdłużno-skrętnych z imperfekcjami typu pęknięcia wału i rozosiowania elementów oraz z zewnętrznymi obciążeniami w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych, wzdłużnych i momentów skrętnych [1, 2]. Obliczenia uwzględniające wpływ niepewności wartości siły poprzecznej wykonano przy następujących założeniach:

- Prędkość obrotowa wału wirnika,  $\omega = 3000$  obr/min
- Wirnik jest doskonale wyważony i nie obciążony w żaden sposób z wyjątkiem przyłożonej siły poprzecznej.
- Wartość siły przyłożonej w węźle 8 (oś symetrii wirnika),  $P = 500$  N.
- Zakres wahań wartości siły 5-20% nominalnej wartości.
- Podstawowy kąt interwału zmian siły  $\Delta\alpha = 2,5^\circ$
- Stosunek prędkości kątowych siły poprzecznej i wału  $x = 1; 0,5; 2$ .



Rys.1. Schemat budowy wirnika i sposobu przyłożenia siły poprzecznej

### 3. METODYKA UWZGLĘDNIANIA NIEPEWNOŚCI WARTOŚCI SIŁY POPRZECZNEJ

Zbudowany przez autora preprocesor przed każdą pętlą obliczeniową uwzględniającą istnienie siły poprzecznej w węźle 8-ym wirnika, zmienia wartość tej siły losowo w zadanym zakresie.

Budowa preprocesora przewiduje dwa rodzaje losowania:

- metodą swobodną, w której jedynym ograniczeniem wartości siły poprzecznej jest zadany zakres (np.  $\pm 20\%$ )
- metodą ograniczoną o dodatkowy zakres maksymalnej zmiany siły w kolejnych krokach iteracyjnych.

Założeniem drugiej z wymienionych metod jest uwzględnienie fizycznego przebiegu zmiany sił poprzecznych w kolejnych krokach iteracyjnych. Przy małych wartościach interwału iteracyjnego

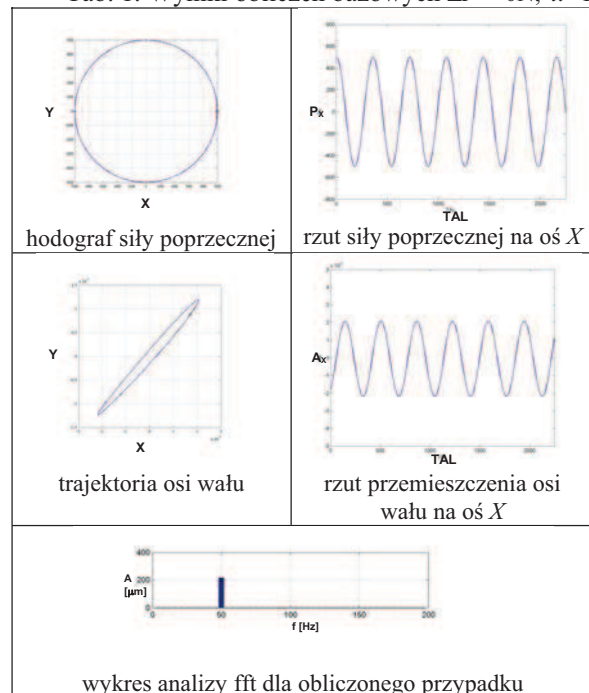
wyrażonego w stopniach obrotu wału (np.  $2,5^\circ$ ), zakłada się, że niemożliwa jest zbyt duża zmiana wartości siły poprzecznej. Istnieją więc dwa ograniczenia jej wahań: zakres ogólny wahań w całym badanym procesie oraz zakres kolejnych zmian siły w następujących po sobie położeniach wału wirnika.

### 4. WYNIKI OBLICZEŃ (METODA SWOBODNA LOSOWANIA)

Obliczenia wykonano dla różnych wartości zakresów wahań wartości siły  $P$  oraz dla różnych stosunków prędkości wirowania siły i wału wirnika. Każdy z wyników porównywano z przypadkami bazowymi, zakładającymi stałą wartość siły poprzecznej.

#### 4.1. Przypadek $x=1$

Tab. 1. Wyniki obliczeń bazowych  $\Delta P = 0N$ ;  $x=1$



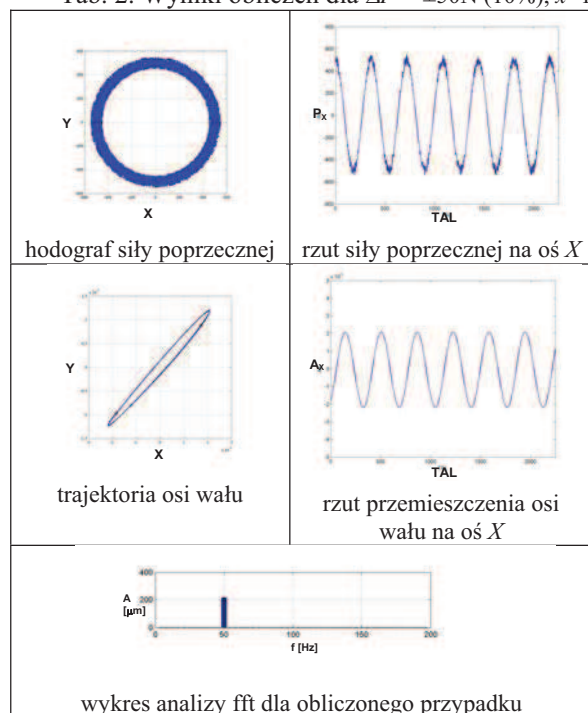
Tablica 1 zawiera graficzne interpretacje wyników obliczeń przypadku bazowego, w którym wirująca siła poprzeczna o wartości  $P = 500N$  nie zmienia swojej wartości i wiruje z prędkości równą prędkości wału wirnika. W lewym górnym narożniku tablicy 1 widoczny jest hodograf siły obciążającej wirnik. W przypadku bazowym (stała wartość siły) jest on okręgiem. Zmienność wartości siły  $P$  w kierunku  $X$  przedstawia rysunek w prawym górnym rogu tablicy. Poniżej przedstawiono odpowiedź układu. Z lewej strony widoczna jest trajektoria osi wirnika w płaszczyźnie do niej prostopadłej oraz rzut przemieszczenia osi wału na jeden z kierunków –  $X$ . W dolnej części tablicy zamieszczono wynik analizy fft drgań wirnika w kierunku  $X$ . W niniejszym opracowaniu posłużono się wyłącznie analizą drgań w jednym kierunku.

Częstotliwości drgań w kierunkach  $X$  oraz  $Y$  w omawianym ruchu wirnika są identyczne (zależne od prędkości obrotowej wirnika). Obserwowane podczas obliczeń różnice dotyczą tylko i wyłącznie amplitud, których wartość wynika ściśle z kształtu otrzymanych trajektorii.

W tabelicy 2 przedstawiono graficzną interpretację uzyskanych wyników obliczeń przy wahanii wartości siły poprzecznej w zakresie  $\pm 10\%$ . W lewej górnej części widoczny jest hodograf siły poprzecznej przyłożonej w połowie wirnika. W porównaniu z odpowiednim rysunkiem z tab. 1, widać wyraźnie rozrzut wartości siły podczas obrotów wirnika (wszystkie rysunki przedstawione w artykule zostały sporządzone dla 12 ostatnich obrotów wału wirnika). Zmianę wartości siły poprzecznej można również zaobserwować analizując rzut siły poprzecznej na kierunek  $X$ . Podczas dynamicznych zmian wartości rzutu siły, efekt wahań wartości siły jest niewidoczny z powodu zbyt małych wartości przyrostów siły w porównaniu ze zmianami wartości rzutu wynikającymi z obrotu wału. Efekt związany ze zmianą wartości siły widać najlepiej w pobliżu lokalnych ekstremów wykresu.

Obraz trajektorii osi wału w węźle 8-ym, w płaszczyźnie prostopadłej do niej, w porównaniu z przypadkiem bazowym, pozostaje bez istotnych zmian. Widoczne jest tylko lekkie pogrubienie linii elipsy po której porusza się os wału.

Tab. 2. Wyniki obliczeń dla  $\Delta P = \pm 50\text{N}$  (10%),  $x=1$



Wynik analizy fft także nie wykazuje żadnych widocznych efektów spowodowanych zmianą wartości siły poprzecznej podczas obrotu wału wirnika. Dominującą częstotliwością drgań wirnika

w kierunku  $X$  jest częstotliwość 50 Hz, wynikająca bezpośrednio z prędkości obrotowej wirnika.

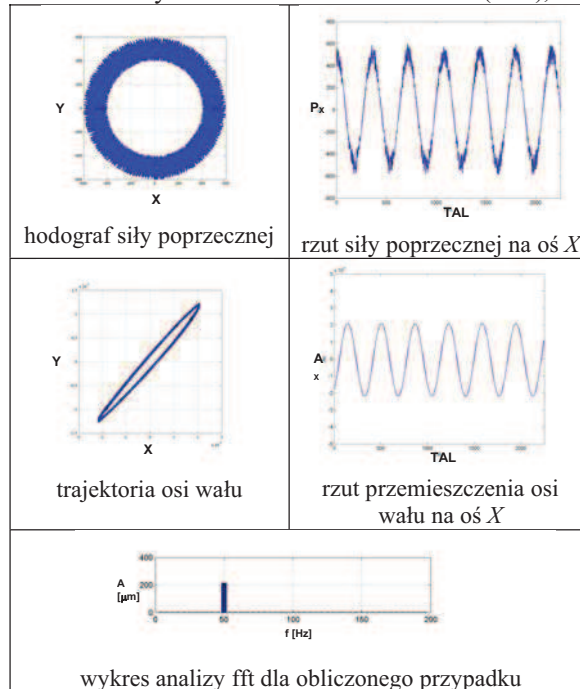
W tabelicy 3 zamieszczono analogiczne wyniki dla przypadku wahanii siły w zakresie  $\pm 20\%$ .

Hodograf siły poprzecznej w tym przypadku wyraźnie wskazuje na wahanii jej wartości. Efekt związany ze zmianą wartości wirującej siły widoczny jest także na obrazie rzutu siły na kierunek  $X$ . Ze względu na większy zakres wahań wartości, wpływ ten jest widoczny nie tylko w okolicach lokalnych ekstremów, ale także na „stokach” wykresu. Jak widać na rysunku przedstawiającym trajektorię osi wału, kształt elipsy, po której porusza się punkt osi wału wirnika, staje się mniej stabilny w porównaniu z przypadkiem bazowym. W interpretacji graficznej widoczny jest grubszy kontur kreślonej elipsy. Obserwacja wyników analizy fft nie pozwala na stwierdzenie zmian.

#### 4.2. Przypadek $x=2$

Rozpatrywany przypadek zakłada wirowanie siły poprzecznej wokół osi wału wirnika z prędkością kątową dwa razy większą w stosunku do prędkości wirowania samego wirnika. Wyniki obliczeń dla tego przypadku, w porównaniu z przypadkiem  $x=1$  charakteryzują się dwa razy większą częstotliwością drgań (tab. 4).

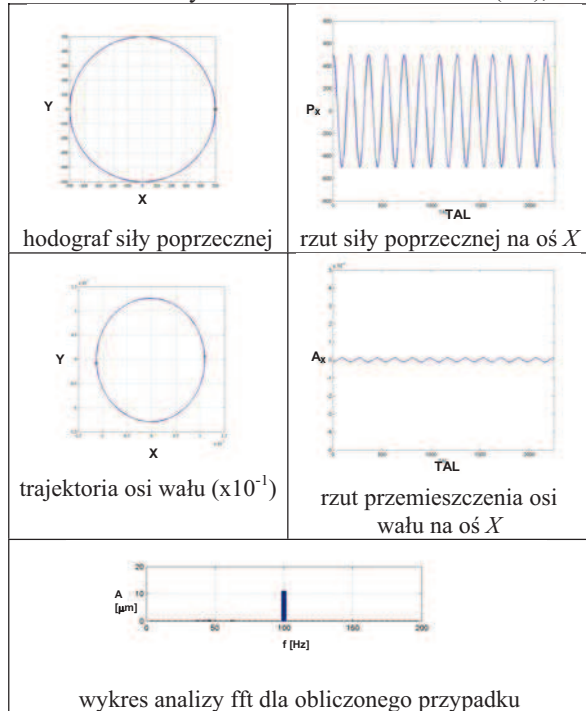
Tab. 3. Wyniki obliczeń dla  $\Delta P = \pm 100\text{N}$  (20%),  $x=1$



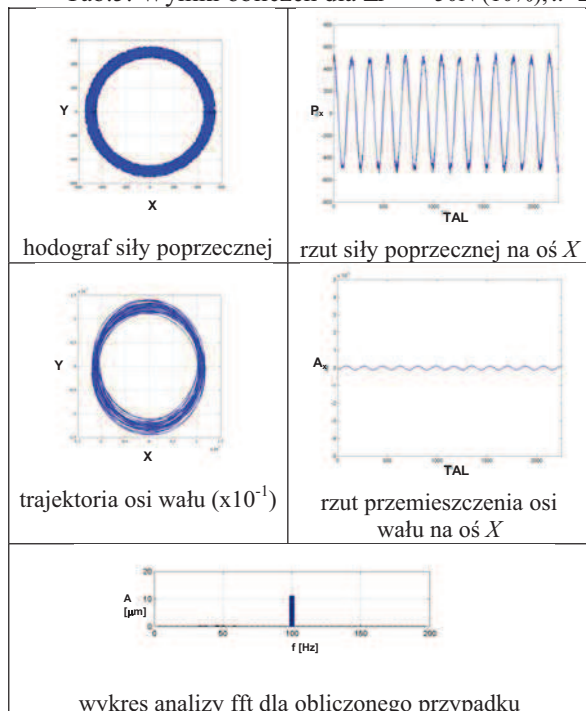
W tabelicy 5 zamieszczono wyniki obliczeń przypadku zakładającego stosunek prędkości obrotowej siły poprzecznej do prędkości obrotowej wału wirnika  $x = 2$  oraz wahanii wartości siły o  $\pm 10\%$  jej wartości nominalnej. Różnica odpowiedzi modelu układu wirnik-łożyska w porównaniu z przypadkiem wirowania współbieżnego siły widoczna jest na pierwszy rzut

oka. Dominująca częstotliwość drgań wynosi w tym przypadku 100 Hz, przy czym pojawiły się również zakłócenia o niższych częstotliwościach. Amplituda drgań, co jest widoczne wyraźnie na obrazie rzutu przemieszczeń osi wału na kierunek  $X$ , postaje wielokrotnie niższa w porównaniu z przypadkiem wirowania współbieżnego.

Tab.4. Wyniki obliczeń dla  $\Delta P = \pm 0N$  (0%),  $x=2$



Tab.5. Wyniki obliczeń dla  $\Delta P = \pm 50N$  (10%),  $x=2$



Podobnie jak w przypadku, gdy  $x=1$ , losowe zmiany wartości siły, widoczne na rysunku w tab. 5

przy wartości 10% nominalnej wartości siły, na rzucie na kierunek  $X$  widoczne są tylko w pobliżu lokalnych ekstremów.

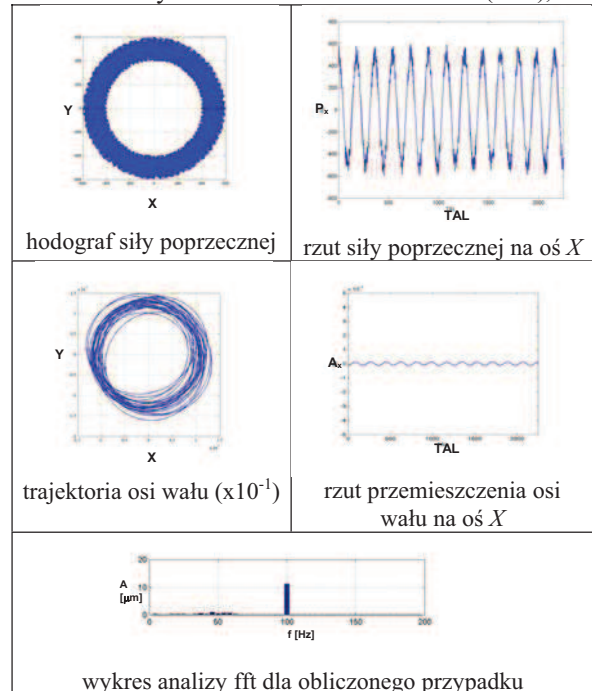
Porównując trajektorie osi wału, w przypadku, gdy obciążająca wirnik siła wiruje dwa razy wolniej, trajektoria ta przyjmuje niemal kołowy charakter (tab. 4). W przypadku wahań wartości siły zostaje ona rozrzucona w kierunku pionowym. Rozrzut w kierunku poziomym jest nieznaczny.

W tabelicy 6 przedstawiono analogiczne wyniki obliczeń, gdy wahania siły wynoszą 20% jej wartości.

Losowe zmiany wartości siły podczas jej obrotu są wyraźnie widoczne na graficznej interpretacji jej rzutu na oś  $X$ . Wahania siły sięgające 20% jej wartości wystarczają, by zaobserwować ich wpływ na kształt krzywej na jej „stokach”. Świadczy to o tym, że zmiany wartości siły miały wpływ na zachowanie się wirnika w czasie każdego, pełnego jego obrotu.

W opisywanym przypadku niestabilność trajektorii wału jest wyraźniejsza. Na jej obrazie widoczne są również zmiany w kierunku poziomym. Analiza fft nie wykazała znaczących zmian w charakterze drgań osi wirnika spowodowanych zwiększeniem amplitudy wahań wartości siły poprzecznej, jednak zaznaczone zostały składowe częstotliwości drgań poniżej 100 Hz.

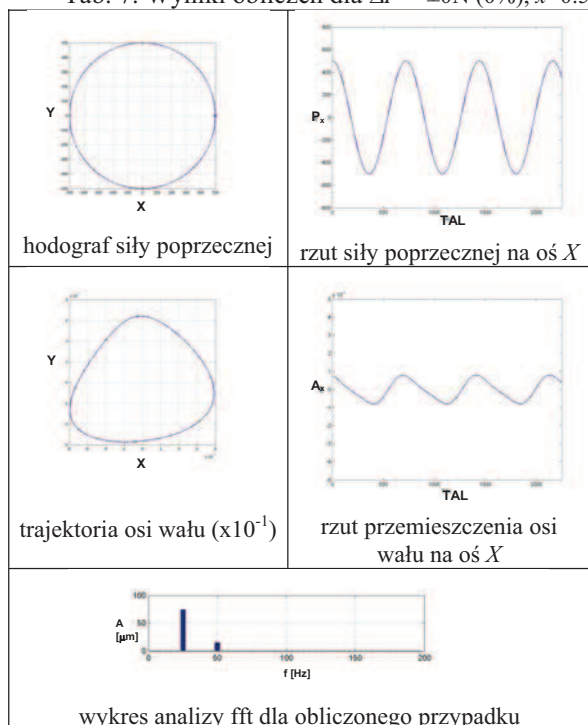
Tab.6. Wyniki obliczeń dla  $\Delta P = \pm 100N$  (20%),  $x=2$



### 4.3. Przypadek $x=0.5$

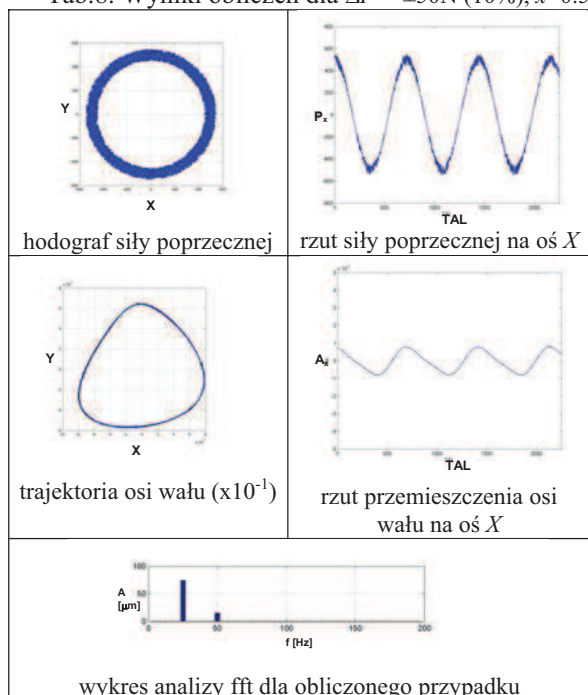
W przypadku współczynnika  $x=0.5$ , siła poprzeczna obciążająca wirnik w węzle 8 wiruje z prędkością kątową dwa razy mniejszą od prędkości wirowania wału. W tabelicy 7 przedstawiono wyniki odpowiedzi modelu układu w przypadku braku wahań wartości siły.

Tab. 7. Wyniki obliczeń dla  $\Delta P = \pm 0N$  (0%),  $x=0.5$



Przypadek, gdy współczynnik  $x=0.5$ , charakteryzuje się dwoma przeważającymi częstotliwościami drgań osi wirnika. Dominującą stała się częstotliwość 25 Hz, co w analogii do wcześniej opisywanych przypadków wydaje się oczywiste, jednak ujawniła się także częstotliwość równa 50 Hz.

Tab.8. Wyniki obliczeń dla  $\Delta P = \pm 50N$  (10%),  $x=0.5$



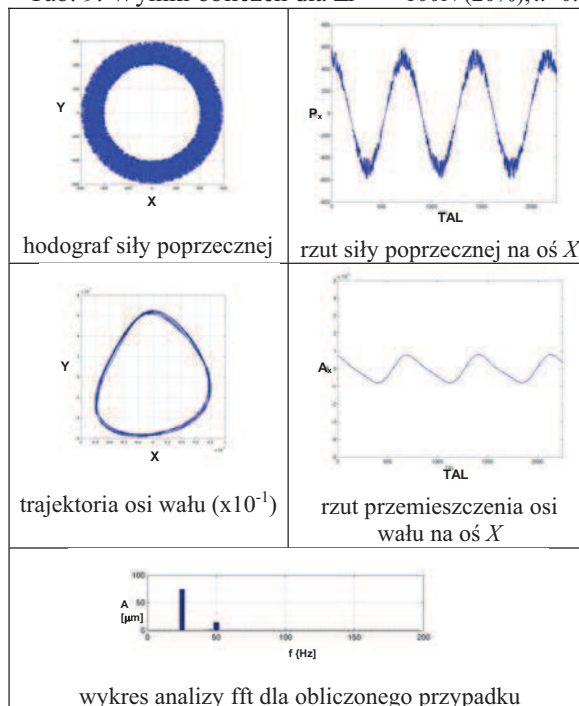
Obraz rzutu siły na kierunek X w tab. 7 pokazuje dwa razy niższą częstotliwość zmian siły na każdym z kierunków, natomiast nieeliptyczny kształt trajektorii wału wirnika generuje zupełnie odmienny obraz rzutu na kierunek X niż we wcześniej omawianych przypadkach.

W tablicy 8 przedstawiono wyniki obliczeń przypadku wahań wartości siły w zakresie 10%. Z powodu dwa razy mniejszej częstotliwości zmian siły na każdym kierunku, wpływ tego wahań widoczny jest już wyraźnie nawet przy tak małych odchyłkach. Charakter trajektorii pozostał bez zmian, podobnie jak wynik analizy fft drgań osi wirnika.

W tablicy 9 zamieszczono graficzną interpretację wyników obliczeń przypadku, gdy siła poprzeczna wirująca dwa razy wolniej niż wirnik zmienia się w zakresie 20%.

Wahania wartości siły w zakresie 100N przy nominalnej wartości 500N wyraźnie zmieniają wykres zmienności jej rzutu na oś X w czasie. Widoczny jest wyraźny wpływ zmienności wartości siły zarówno w okolicach lokalnych ekstremów funkcji jak i na jej tzw. „stokach”. Odpowiedź modelu układu przedstawia trajektorię o podobnym do poprzednio przedstawianych kształcie, jednak kształt trajektorii stał się niestabilny. Obraz składowej drgań w kierunku X nie pozwala na stwierdzenie różnic w drganiach między kolejnymi przypadkami, podobnie jak analiza fft.

Tab. 9. Wyniki obliczeń dla  $\Delta P = \pm 100N$  (20%),  $x=0.5$



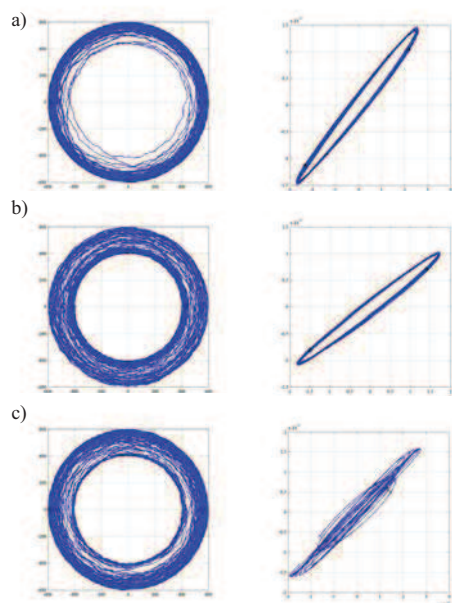
## 5. METODA LOSOWANIA Z OGRANICZENIAMI. PROBLEMY INTERPRETACJI WYNIKÓW

Opisywana w rozdziale 3 metoda losowania przy stosowaniu ograniczeń zakłada, że w kolejnym kroku iteracyjnym (co 2,5° obrotu wału wirnika) siła poprzeczna nie może zmienić się co do wartości więcej niż wynosi zadane ograniczenie.

Uwzględniając wysokie prędkości obrotowe wałów wirników oraz przy dużych wartościach sił poprzecznych i innych obciążeń wirnika, nie można zakładać możliwości ich zmienności w całym założonym zakresie podczas jednego kroku iteracyjnego.

*Przykład: prędkość obrotowa wirnika  $n=3000$  obr/min, częstotliwość drgań 50 Hz, siła poprzeczna wirująca wraz z wirnikiem.*

*Zmienności siły co 2,5° obrotu wału powoduje częstość tych zmian równą 7.2 kHz. Przy zmienności siły w zakresie  $\pm 20\%$  (w przyjętym modelu to  $\pm 100N$ ) oznacza to, że zmiana siły w ciągu obrotu wału o 2.5° sięga niemal połowy jej wartości i może występować w każdym kolejnym kroku iteracyjnym z obliczoną częstotliwością.*



Rys. 2. Wybrane hodografy siły poprzecznej oraz odpowiadające im trajektorie ( $x=1$ )

Wybrane wyniki obliczeń sprawdzających wpływ wprowadzenia dodatkowego ograniczenia w losowaniu wartości siły poprzecznej, zamieszczone w niniejszym rozdziale wykażą istnienie pewnych problemów związanych z ich interpretacją.

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń dla trzech powtórzeń przy tych samych parametrach ograniczających zmienność wartości siły poprzecznej obciążającej wirnik ( $x=1$  – siła wiruje zgodnie z wirnikiem):

$$\Delta P = 20\%,$$

$$\Delta \alpha = 2.5^\circ,$$

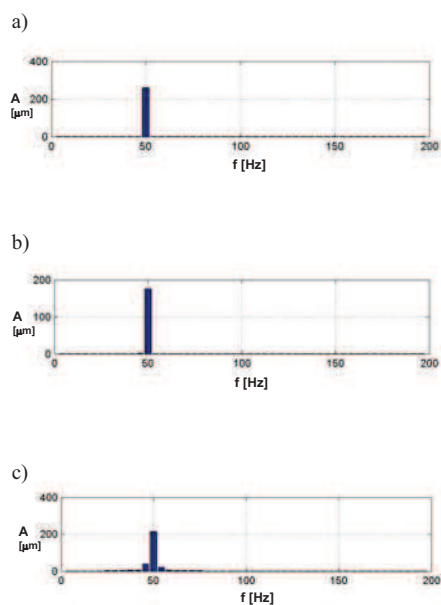
$$\delta_{\max} P = 2\%.$$

W niniejszym opracowaniu, zmiana siły poprzecznej w kolejnych krokach iteracyjnych, została ograniczona do dziesiątej części całkowitego zakresu jej zmienności. W przypadku, gdy losowanie za każdym razem przewidywałoby wzrost siły o maksymalny dozwolony zakres, podczas zmiany siły z wartości nominalnej do wartości  $P+\Delta P$  wirnik obróciłby się o 25°. Przy losowaniu nakazującym zmianę z wartości  $P+\Delta P$  na  $P-\Delta P$ , wirnik obróciłby się o 50°.

W lewej części rys. 2 zamieszczone zostały obrazy sił w 12 ostatnich obliczanych obrotach wału wirnika. W przypadku a) widoczne jest skupienie wartości w pobliżu górnego zakresu zmienności wartości siły, w przypadkach b) i c) rozkład wartości wynikających z losowania jest bardziej równomierny w całym przedziale zmienności wartości siły, jednak również widać między nimi różnice dotyczące skupienia większości losowanych wartości wokół minimalnej (przyp. b) oraz maksymalnej (przyp. c) wartości dopuszczalnej.

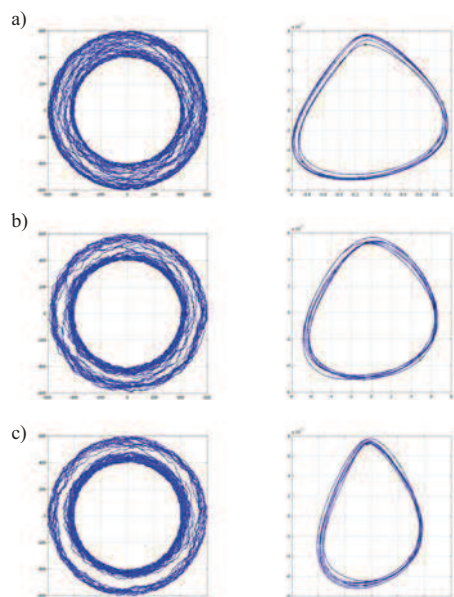
Wpływ różnego wyniku losowania zmienności wartości siły poprzecznej można przeanalizować porównując wyniki z prawej strony rys. 2. W przypadku a) widoczna jest regularna eliptyczna trajektoria osi wału wirnika, wykazująca lekką niestabilność, co jest wynikiem zmian wartości siły. Przypadek b), mimo całkowicie innego przebiegu zmienności siły poprzecznej, jest bardzo podobny, jeśli chodzi o kształt trajektorii osi wirnika, jednak widoczny jest nieco inny kąt pochylenia osi elipsy, po której krążył modelowy punkt osi wirnika. W przypadku przedstawionym na rys. 2c. widoczne jest znaczące zaburzenie charakteru trajektorii osi wirnika. Mimo obrazu siły będącego przypadkiem pośrednim między a) i c), obraz trajektorii osi wału wirnika jest zaburzony, a z elipsy o podobnych parametrach geometrycznych do pozostałych przypadków, została wyodrębniona, zarysowana podczas kilku obrotów wirnika elipsa o krótszej osi.

Na rys. 3 przedstawiono rezultaty analizy fft wcześniej opisywanych wyników obliczeń. W przypadkach a) i b) drgania w jednym z kierunków różnią się tylko amplitudą, za co odpowiada różny kąt pochylenia elips trajektorii wirnika. Przypadek c) obliczeń spowodował pojawienie się znaczących amplitud drgań o częstotliwościach różnych od częstotliwości wynikającej z prędkości obrotowej wału wirnika.



Rys. 3. Wyniki analizy fft obliczeń przedstawionych na rys. 2

Na rys. 4 zamieszczono analogiczne wyniki trzech powtórzeń obliczeń dla siły wirującej z prędkością równą połowie prędkości obrotowej wału wirnika.



Rys. 4. Wybrane hodografy siły poprzecznej oraz odpowiadające im trajektorie ( $x=0.5$ )

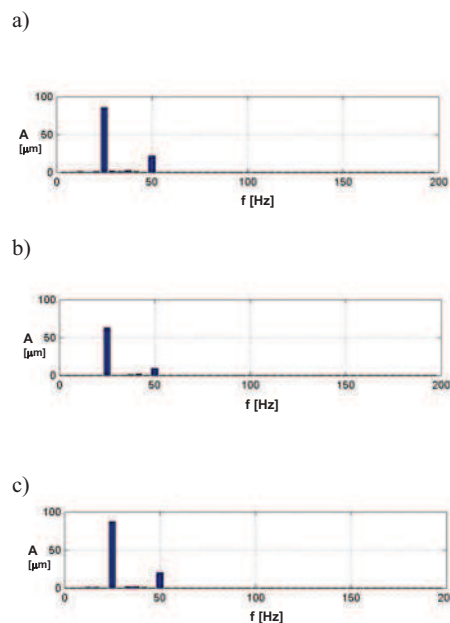
Przypadek a) na rys. 4 odpowiada losowaniu wartości siły poprzecznej, które w dwunastu

ostatnich obrotach wirnika rozłożyły jej wartość równomiernie między ekstremalnymi jej wartościami, przewidzianymi zakresem losowania. W przypadkach b) i c) wartość wygenerowanej siły skupia się wokół krańcowych wartości z przedziału dozwolonego, przy czym większość generowanych losowo wartości jest zbliżona do minimalnej dozwolonej wartości siły.

Wpływ różnego przebiegu zmienności wartości siły podczas obrotu wirnika na trajektorię jego osi widoczny jest po prawej stronie rys. 4, a wyniki analizy fft każdego z analizowanych przypadków przedstawiono na rys. 5.

Trajektorie różnią się wyraźnie. Wyróżnikiem różnic może być stosunek ich wymiarów w kierunku  $X$  i kierunku  $Y$ . Porównanie trajektorii z przypadku a) oraz c) pozwala zauważyć smukłość trajektorii w kierunku pionowym w przypadku c).

Porównując wyniki analizy fft można zauważyć charakterystyczne dla współczynnika  $x=0.5$  dwa pązki dominujących drgań. Najwyższe wartości drgań o częstotliwości 25 Hz w przypadku b) są niższe niż w pozostałych porównywanych przypadkach. Ma to związek ze wspomnianą małą smukłością oraz małym stosunkiem amplitudy w kierunku pionowym i poziomym (z przyczyn edytorskich mało widoczna podziałka na rysunku).



Rys. 5. Wyniki analizy fft obliczeń przedstawionych na rys. 4

## 6. PODSUMOWANIE

Przedstawione obliczenia są pierwszymi z cyklu badań autora nad wpływem niepewności danych wejściowych w modelowaniu zjawisk związanych z maszynami wirnikowymi. Przyjęcie prostego

modelu układu wirnik-łożyska pozwoliło na bezpośrednie obserwowanie wpływu zmian wartości siły obciążającej wirnik na trajektorię jego wału.

Otrzymane wyniki, których liczba jest znacznie większa, niż przedstawiona w niniejszym artykule, pozwoliły na sformułowanie kilku wniosków:

- Analiza konkretnych przypadków wykazała, że wprowadzenie wahań losowych siły poprzecznej do modelu wirnika z jednym dyskiem nie wprowadza większych zmian w trajektorii osi wału wirnika w porównaniu z przypadkiem bazowym (siła poprzeczna o stałej wartości). Widoczny jest jednak wyraźny rozrzut toru osi wirnika w płaszczyźnie poprzecznej osi wału.
- Niezależnie od zakresu zmian losowych wartości siły poprzecznej odpowiedź układu w postaci wykresu analizy fft nie wykazywała znaczących zmian w stosunku do przypadków bazowych (siła poprzeczna o stałej wartości).
- W miarę zwiększania zakresu losowych wahań siły poprzecznej w modelu spada jego stabilność (zjawisko najbardziej widoczne dla  $x = 0,5$ ).
- Analiza fft nie może być uważana za uniwersalne narzędzie badań wirującego wirnika, na który oddziałuje siła poprzeczna, gdyż nie wykazuje reakcji na wahania tejsze siły, a więc nie buduje informacji na temat charakteru siły.
- Oprócz trudności w interpretacji otrzymywanych wyników, podstawowym problemem w modelowaniu z uwzględnieniem niepewności danych wejściowych, jest odpowiednie opracowanie algorytmu generowania ich losowych przebiegów.
- Niezbędne jest wykonanie obliczeń dla przypadków występowania kilku sił poprzecznych losowo zmiennych i działających w różnych kierunkach. Mogą one prowadzić do ciekawych obserwacji równoczesnego wpływu losowych zmian wartości sił na trajektorię wirującego wału.

Dalsze badania autora artykułu skupią się na modelowaniu zjawisk związanych z rezonansem układów wirnik-łożyska, utratą stabilności przez układ wirnik-łożyska przy nadmiernym wzroście prędkości obrotowej, czemu towarzyszą tzw. wiry olejowe oraz bicie olejowe oraz nad modelowaniem niektórych klas defektów np. otarć elementów wału wirnika o nieruchome elementy układu.

Otrzymane wyniki mogą posłużyć do rozwoju technik modelowania i zastępowania doświadczeniami numerycznymi często niebezpiecznych eksperymentów przeprowadzanych na fizycznym obiekcie lub modelu maszyny wirnikowej.

## LITERATURA

- [1] Kiciński J. i inni: *Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, aerodyna-micznych i magnetycznych w turbozespołach energetycznych*, Gdańsk, IMP PAN 2005.
- [2] Kiciński J., *Dynamika wirników i łożysk ślizgowych*, Gdańsk, IMP PAN 2005.
- [3] Pietkiewicz P., Kiciński J., Czoska B., Markiewicz A.: *Opracowanie modelu defektów z uwzględnieniem niepewności danych wejściowych*, opr wew. IMP PAN 2006.

---

Dr inż. **Paweł PIETKIEWICZ** ur. w 1973 roku w Olsztynie, adiunkt w Katedrze Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn UWM w Olsztynie. Do roku 2002 zajmował się zagadnieniami uderzenia hydraulicznego w przewodach hydrauliki siłowej.

W 2002 roku zajął się badaniami nad relacjami diagnostycznymi w pompach zębatych, a w 2005 roku rozpoczął współpracę z Instytutem Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku w zakresie modelowania maszyn wirnikowych.