SYGNAŁY POBUDZAJĄCE DRGANIA MASZYN WIRNIKOWYCH NA POTRZEBY DIAGNOSTYKI PĘKANIA WAŁÓW

Zdzisław Gosiewski[*], Jerzy T. Sawicki[**], Robert Zabielski[*]

[*] Katedra Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok
[**] Department of Mechanical Engineering Cleveland State University 2020 Euclid Avenue, Cleveland, USA

gosiewski@pb.bialystok.pl, j.sawicki@csuohio.edu, robertus@poczta.fm

Streszczenie: Pękanie wału prowadzi do asymetrii jego sztywności. Według modelu pękania Mayesa sztywność zmienia się w sposób cosinusoidalny. Tego typu wymuszenie parametryczne prowadzi do kombinowanych rezonansów. Większość autorów bada zachowanie się dynamiczne wirnika w otoczeniu takiego rezonansu. W niniejszym artykule do badań diagnostycznych przyjęto model Jeffcotta dynamiki wirnika. Wyprowadzono równania ruchu uszkodzonego i nieuszkodzonego wału. Analizę drgań tego modelu nieliniowego przeprowadzono z wykorzystaniem metody małego parametru. Zaproponowano podejście transmitancyjne do modelowania uszkodzenia. Przeanalizowano możliwość pobudzania drgań maszyny z wykorzystywaniem różnych typów sygnałów. Z wielu możliwych rozwiązań prowadzących do uzyskania informacji diagnostycznej wybrano do dalszych badań model reprezentowany przez funkcję odpowiedzi częstotliwościowej. Różnica pomiędzy dynamiką uszkodzonego i nieuszkodzonego wirnika została użyta do uwypuklenia pików rezonansów kombinowanych w widmie drganiowym. Na bazie tych wymuszeń określono symptomy, z wykorzystaniem których można budować wskaźniki diagnostyczne. Rozważania analityczne poparto badaniami symulacyjnymi. Słowa kluczowe: pękanie, wirnik Jeffcotta, monitorowanie stanu technicznego, techniki wzbudzenia.

1. WPROWADZENIE

Aby uzyskać informację o stanie technicznym maszyn wirnikowych stosowano rozmaite techniki wzbudzenia ich drgań. Niniejszy artykuł stanowi pewne studium analizy efektywności dobieranych wzbudzeń i możliwości przetwarzania sygnałów celem detekcji i diagnostyki pękania wału maszyny wirnikowej. Do oceny efektywności wykorzystano komputerowy model Jeffcotta dla pękniętego i niepękniętego wału. Analizowane drgania wirnika są pobudzane jego niewyważeniem, siłą ciężkości, zmianą parametrów pękniętego wału opisanego modelem Mayesa oraz dodatkowymi pobudzeniami.

Wibroakustyczne sygnały w maszynach wirnikowych są używane do celów identyfikacji i diagnostyki. Takie sygnały mogą być generowane przez zjawiska i siły wynikające z eksploatacji maszyny albo mogą być pobudzane przez dodatkowe urządzenia. Urządzenia pobudzające drgania są generatorami siły. Powinny być one zdolne wytwarzać siły o zadanej amplitudzie i w pożądanym zakresie częstotliwości nazwanym pasmem przenoszenia. Istnieje niewiele urządzeń spełniających te wymagania. Są to: elektrohydrauliczne albo elektromagnetyczne wzbudniki, łożyska magnetyczne, piezoelektryczne siłowniki.

Wirnik w maszynach wirnikowych ma wysoką energię kinetyczną rosnącą z kwadratem prędkości obrotowej. Pęknięcie wirującego wirnika może powodować katastroficzne następstwa. Wykrycie pękania w wczesnym stadium może uratować wirnik od nieodwracalnych uszkodzeń. Przez kontrolę rodzaju i głębokości pękania byłby możliwe bez zbędnego ryzyka użytkowanie pękniętych wirników. Wielu badaczy poszukiwało symptomów celem wczesnego wykrycia pękania wirników. Informacje na ten temat zostały zebrane w pracy (Kiciński, 2006). Wszystkie modele pęknięć prowadzą do nieliniowego opisu dynamiki wirnika z powodu asymetrii sztywności wirnika (Gosiewski, Muszyńska, 1992) oraz z powodu dodatkowego parametrycznego wzbudzenia wibracji wirnika (Sawicki, Baaklini, Gyekenyesi 2004).
We wczesnym stadium pęknięcia zmiany sztywności wirnika są modelowane funkcją cosinus (Gasch, 1993), co prowadzi do kombinowanych rezonansów (Quinn, Mani, Kasandra, Bash, Inman, Kirk, 2005).

Kombinowane rezonanse są szczególnie dobrym źródłem informacji na potrzeby detekcji pękania wirnika. Niestety, mają małe amplitudy w porównaniu z innym rezonansami. W niniejszym artykule skoncentrowano się na kwestiach związanych z wzbudzeniem sygnałów diagnostycznych i na ich obróbce. Szukano sposobów wzmacnia wartości amplitud rezonansów kombinowanych na tle innych składowych widma wibroakustycznego. Okazuje się, że korzystnym jest badanie różnicy sygnałów pękniętego i niepękniętego wirnika. Wykorzystuje się przy tym sygnały procesu przejściowego i/lub procesu ustalonego drgań oraz analizuje te sygnały dla różnych pobudzeń. Podstawy takiej analizy sygnałów wibroakustycznych w zakresie jakościowym zastały przedstawione w pracy (Gosiewski, Sawicki, 2007). Obecnie podjęto pierwszą próbę ich oceny ilościowej.

2. MODELOWANIE ZEWNĘTRZNEGO WZBUDZENIA

Siły wymuszające generowane przez zewnętrzne urządzenia mogą mieć różny kształt. Można stosować sygnały sinusoidalne, typu „*chirp*", impulsowe, pulsowe, skokowe albo pseudo-biały szum. Wewnętrzne wzbudzenie ma zwykle charakter okresowy (suma sinusoid). Tak więc, możemy podzielić wszystkie sygnały pobudzające na dwie grupy: trygonometryczne i pulsacyjne. Pierwsza grupa zwykle jest używana do generowania drgań ustalonych, podczas gdy pulsacje są używane dla generowania procesów przejściowych.. Dla prawidłowego pobudzenia układu mechanicznego należy unikać lokowania sił wymuszających i elementów pomiarowych w węzłach postaci drgań. Trygonometryczne sygnały możemy włączyć do modelu układu w sposób przedstawiony w pracy (Gosiewski, 1989).

Równania ruchu dla modelu Jeffcotta niepękniętego wirnika mają postać:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x &= e\Omega^2\cos\Omega t + \frac{F_x(t)}{m} \\ \ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y &= e\Omega^2\sin\Omega t \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie mamy zerowe warunki początkowe i pobudzenie przez niewyważenie oraz dodatkową siłę F_x. Rozwiązanie równań w przestrzeni stanu jest sumą całki ogólnej i całki szczególnej:

$$\mathbf{x}_0(t) = e^{\mathbf{A}_0 t}\mathbf{x}_0(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}_0(t-\lambda)}\mathbf{B}\,\mathbf{u}(\lambda)\,d\lambda \tag{2}$$

gdzie:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n & 0 & 0 & e\Omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n & 0 & 0 & e\Omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega^2 & 0 \end{bmatrix},\quad \mathbf{x}_0(t) = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ u_x \\ \dot{u}_x \\ u_y \\ \dot{u}_y \end{bmatrix},\quad \mathbf{x}_0(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\mathbf{B}\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} 0 & F_x(t)/m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \tag{3a}$$

Rozszerzony (o równania generujące siły od niewyważenia) model dynamiki wirnika w przestrzeni stanu ma więc postać:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \tag{4}$$

gdzie dla pomiaru przemieszczenia wirnika w kierunku osi *x* mamy: C=[1 0 0 0 0 0 0 0]. W macierzy **B** zawarte są parametry związane z rozmieszczaniem sił pobudzających drgania, podczas gdy wektor **u** zawiera zmienne opisujące przebieg sił wymuszających. Zauważmy, że dla równań (1) założono zerowe warunki początkowe, podczas gdy w równaniach (4) warunki początkowe opisane są niezerowym wektorem $\mathbf{x_0}(t)$ (3).

3. MODEL PĘKNIĘTEGO WIRNIKA.

Rozważmy model Mayesa (Mayes, Davis, 1884) pękniętego wirnika. Model Jeffcotta wirnika z niewielkim pęknięciem ma postać (Sawicki, Baaklini, Gyekenyesi, 2004):

$$\mathbf{M}\,\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\,\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{T}^T\tilde{\mathbf{K}}(\phi,t)\mathbf{T}(\mathbf{q}+\mathbf{q}_{\mathbf{st}}) = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{un} + \mathbf{F}_{ex} \tag{5}$$

gdzie:

$$\tilde{\mathbf{K}}(\phi,t) = \begin{bmatrix} 0.5(k_0+k_\alpha)+0.5(k_0-k_\alpha)\cos\phi & 0 \\ 0 & 0.5(k_0+k_\beta)+0.5(k_0-k_\beta)\cos\phi \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix},$$

$\mathbf{M}$, $\tilde{\mathbf{K}}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{F}_g$, $\mathbf{F}_{un}$, $\mathbf{F}_{ex}$ są odpowiednio macierzami masy, sztywności, tłumienia, sił ciężkości, sił od niewyważenia i sił zewnętrznych. Macierz sztywności $\tilde{\mathbf{K}}$ podana jest we współrzędnych wirujących wraz z wirnikiem 0αβ, k_0 jest współczynnikiem sztywności nie pękniętego symetrycznego wału, natomiast k_α, k_β są sztywnością pękniętego wału z otwartym pęknięciem, $\phi=\Omega t+\phi_0$ jest kątem między pęknięciem i wektorem odpowiedzi dynamicznej wirnika. Po wprowadzeniu macierzy transformacji $\mathbf{T}$ do równania (5) otrzymujemy następujący model pękającego wirnika:

$$\mathbf{M}\,\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\,\dot{\mathbf{q}} + [\mathbf{K}_0 - \Delta\mathbf{K}(t)]\mathbf{q} = \Delta\mathbf{K}(t)\mathbf{q}_{\mathbf{st}} + \mathbf{F}_{un} + \mathbf{F}_{ex} \tag{6}$$

$$\mathbf{K}_0\mathbf{q}_{\mathbf{st}} = \mathbf{F}_g$$

gdzie:

$$\mathbf{K}_0 = \begin{bmatrix} k_0 & 0 \\ 0 & k_0 \end{bmatrix},\quad \Delta\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix},$$

$$\Delta\mathbf{K}(t) = \sum_{m=0}^{3}\Delta\mathbf{K}_m\cos(m\Omega t+\varphi_m)\,.$$

4. ROZWIĄZANIE RÓWNAŃ RUCHU.

Żeby obliczać odpowiedź niestacjonarnego układu (6) zastosowano metodę małego parametru ε. Związemy ε z $\Delta\mathbf{K}$, a rozwiązanie przybierze postać szeregu:

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_0(t) + \varepsilon\mathbf{q}_1(t) + \varepsilon^2\mathbf{q}_2(t) + \cdots \tag{7}$$

Powyższe rozwiązanie wstawimy do równania (6). Łącząc elementy równań (6) zawierające mały parametr ε w tej samej potędze otrzymujemy układ równań:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_0 + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}_0 + \mathbf{K}_0\mathbf{q}_0 = \mathbf{F}_{un} + \mathbf{F}_{ex} \tag{8a}$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_1 + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}_1 + \mathbf{K}_0\mathbf{q}_1 = \Delta\mathbf{K}(t)\mathbf{q}_0 + \Delta\mathbf{K}(t)\mathbf{q}_{\mathbf{st}} + \mathbf{F}_{un} + \mathbf{F}_{ex} \tag{8b}$$

..... (8c)

Rozwiązanie równania (8a) jest podane wzorem (2). Rozwiązanie (2) podstawiamy do równania (8b). Wówczas pojawiają się w równaniu (8b) macierze z elementami $e^{-\xi\omega_n t}A_{1m}\cos\left(\left|m\Omega\pm\omega_s\right|t+\varphi_m\right)$, m=1,2,3,…, które w macierzy $\mathbf{A}_1$ są reprezentowane poprzez podmacierz:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\left|m\Omega\pm\omega_s\right|^2 & -\xi\omega_n \end{bmatrix},\quad \omega_s = \omega_n\sqrt{1-\xi^2}\,. \tag{9}$$

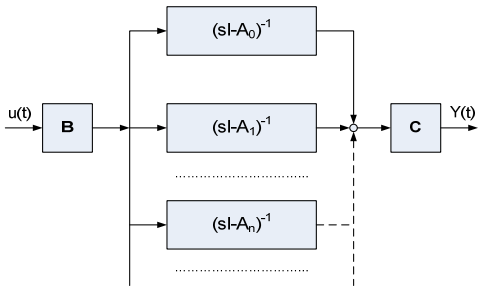
W przestrzeni stanu rozwiązanie równania (8b) ma postać:

$$\mathbf{x}_1(t) = e^{\mathbf{A}_1 t}\mathbf{x}_1(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}_1(t-\lambda)}\mathbf{B}\mathbf{u}(\lambda)\,d\lambda \tag{10}$$

i ostatecznie rozwiązanie (7) w przestrzeni stanu przyjmie postać:

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}_0 t}\mathbf{x}_0(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}_0(t-\lambda)}\mathbf{B}\mathbf{u}(\lambda)\,d\lambda + \varepsilon\left(e^{\mathbf{A}_1 t}\mathbf{x}_1(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}_1(t-\lambda)}\mathbf{B}\mathbf{u}(\lambda)\,d\lambda\right) + \mathbf{x}_{res}(t) \tag{11}$$

gdzie $\mathbf{x}_{res}(t)$ jest pozostałością zawierającą wyższe elementy szeregu potęgowego. Macierze $\mathbf{A}_0$, $\mathbf{A}_1$, …mają różne wymiary. Zatem macierze $\mathbf{C}_0$, $\mathbf{C}_1$, …, i $\mathbf{B}_0$, $\mathbf{B}_1$, … mają różne wymiary, ale te różnice dotyczą tylko dodatkowych zerowych elementów macierzy. Należy podkreślić, że wzbudzenie w naszym modelu generowane jest przez zewnętrzny wzbudnik, a niewyważenie i inne wymuszenia „wewnętrzne" są włączone do macierzy stanu. Model transmitancyjny rozwiązania podany jest na rys.1.



Rys. 1. Model wejście –wyjście pękniętego wirnika

5. METODY DIAGNOSTYCZNE.

Ma bazie modelu z rys. 1 możliwe jest konstruowanie różnych wskaźników diagnostycznych. Zauważmy, że pobudzenie sinusoidalne: $u(t) = A_u \cos\left(\left|m\Omega \pm \omega_s\right| t\right)$ (które pobudza jeden z kombinowanych rezonansów) jest tylko jednym z możliwych sposobów pobudzenia. Można rozważyć również następujące rozwiązania.

- Jednoczesne pobudzenie i pomiar w więcej niż jednym punkcie konstrukcji.
- Wykorzystanie drgań ustalonych lub przejściowych w konstruowaniu wskaźników diagnostycznych.
- Analiza sygnałów w dziedzinie czasu lub
  w dziedzinie częstotliwości.
- Wykorzystanie różnych metod przetwarzania sygnałów.

Do oceny diagnostycznej można wykorzystać pierwszą (proces przejściowy – drgania swobodne) lub drugą (proces ustalony – drgania wymuszone) składową rozwiązania (10) dla małego parametru równego: ε=1. Tu w macierzy $\mathbf{A}_1$ zawarta jest informacja o rozpoczęciu się procesu pękania. Przybliżoną informację otrzymamy odejmując przebiegi drganiowe pękniętego i niepękniętego wału:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= \mathbf{C}\{e^{\mathbf{A}_1 t}\mathbf{x}_1(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}_1(t-\lambda)}\mathbf{B}\mathbf{u}(\lambda)\,d\lambda]\} \\ &\cong \mathbf{C}\mathbf{x}(t) - \mathbf{C}\{e^{\mathbf{A}_0 t}\mathbf{x}_0(0) - \int_0^t e^{\mathbf{A}_0(t-\lambda)}\mathbf{B}\mathbf{u}(\lambda)\,d\lambda\} \end{aligned} \tag{12}$$

W powyższym równaniu wyraziliśmy różnicę pomiędzy drganiami pękniętego i niepękniętego wału w dziedzinie czasu. Równie dobrze można tę różnicę określić w dziedzinie częstotliwości. W każdym z tych przypadków należy odpowiednio dobrać początek pobieranego sygnału. Uniknąć problemów z początkiem pobierania sygnałów możemy w przypadku zastosowania transformat w dziedzinie częstotliwości lub funkcji autokorelacji w przypadku dziedziny czasu.

6. SYMULACJE KOMPUTEROWE.

Zgodnie z modelem Jeffcotta masa wirnika w postaci tarczy osadzona jest na środku bezmasowego giętnego wału. Zakładamy, że przed rozpoczęciem pękania wirnik miał izotropową strukturę. Rezonans wypadał przy 40 Hz, a prędkość obrotowa wału wynosiła 36 Hz. Przyjęto 3% tłumienie zewnętrzne i mimośród środka masy e=0.1 mm. A to oznacza, że przyjęto te same parametry jak w przykładzie z artykułu (Penny, Friswell, Zhou).

Następnie założono pęknięcie na głębokość 40% promienia wału w postaci płaskiego bezubytkowego nacięcia. Prowadzi to do 9% redukcji sztywności wału w kierunku normalnym do linii cięcia, a w kierunku stycznym - do 4% redukcji sztywności.

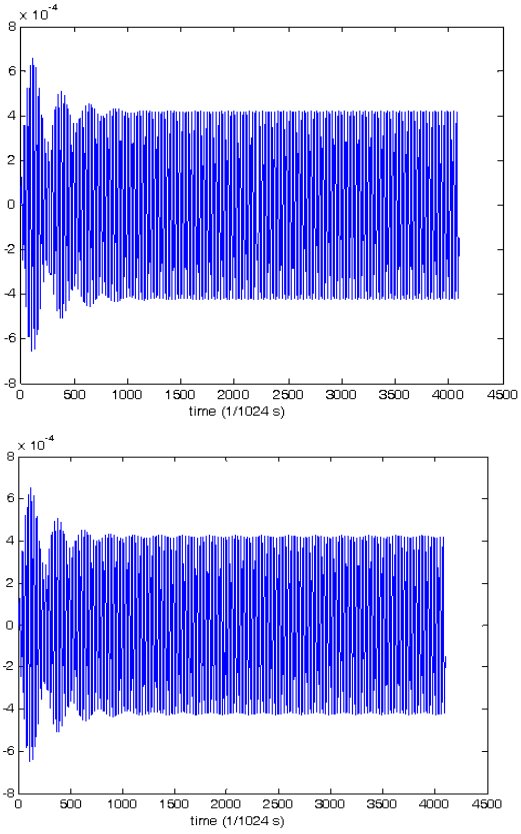
Przebieg drgań w ciągu pierwszych czterech sekund symulacji dla niepękniętego wirnika pokazano na rys. 2a (całkowanie układu równań (1)), natomiast dla pękniętego wirnika - na rys. 2b (całkowanie układu równań (6)). Różnice są minimalne i w przypadku obciążenia sygnałów szumem pomiarowym będą nierozróżnialne. Dlatego należy sygnały drganiowe poddać dalszym przekształceniom w celu poszukiwania informacji diagnostycznej.

- Najpierw poddano przekształceniu FFT początkowy fragment sygnału celem jednoczesnego oszacowania zawartości widmowej zarówno procesu przejściowego jak i drgań ustalonych.
- Następnie pobudzano sygnałem sinusoidalnym poszczególne rezonanse kombinowane celem oceny tego pobudzenia jako wskaźnika diagnostycznego.
- W kolejnym etapie symulacji wykorzystano Simulinkową funkcję *chirp* celem oceny całego widma drganiowego.
- W kolejnym kroku wykorzystano funkcję impulsową celem pobudzenia procesu przejściowego. Na bazie procesu przejściowego wyznaczyć można parametry Markowa, z których z kolei otrzymamy modalny model układu w przestrzeni stanu. Model ten powinien pozwolić nam oszacować wielkość pęknięcia. Ten etap pracy będzie opisany w oddzielnym artykule.

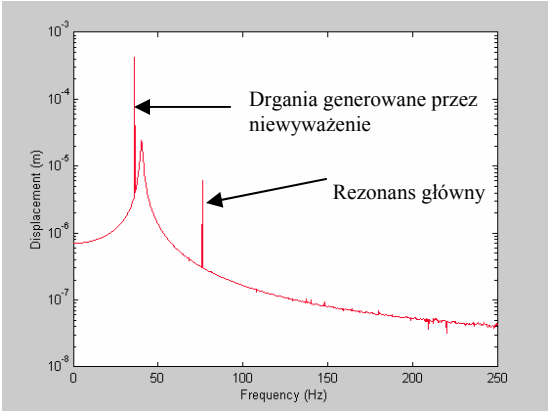
6.1. Widmo drganiowe

Poddano przekształceniu FFT drgania pękniętego wirnika. Analizę widmową należy realizować na sygnałach ustalonych. Przekształceniu FFT poddano więc sygnał już po zaniku procesu przejściowego (poczynając od setnej sekundy symulacji czasowej). Wyniki takiej symulacji przedstawione są na rys. 3. Na widmie widać szczątkową charakterystykę procesu przejściowego obciążonego szumem wynikającym z błędów numerycznych. Nie można

natomiast zauważyć rezonansów kombinowanych. Jeśli by do tego dodać występujący w rzeczywistości szum pomiarowy, to nie ma szans, aby z takiego widma uzyskać informację diagnostyczną o pęknięciu wału wirnika.

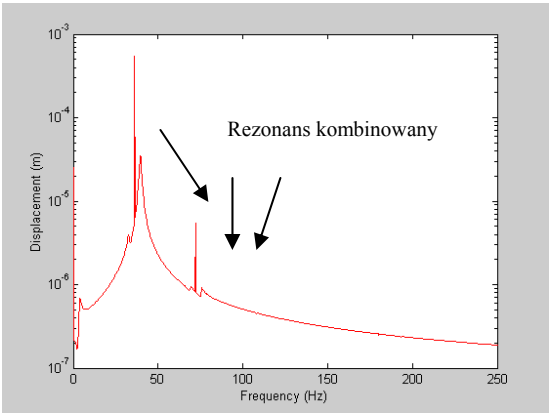


Rys. 2. Przebieg drgań w czasie 4 sek.: a) nie pęknięty wirnik b) pęknięty wirnik



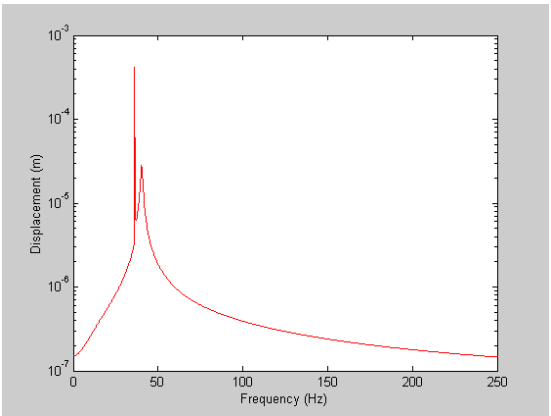
Rys. 3. Częstotliwość widmowa pękniętego wirnika; widmo drgań ustalonych.

Powyższe oznacza, że należy poddać diagnozowany wirnik dodatkowemu pobudzeniu. Zauważmy, że na początku symulacji występuje znaczący proces przejściowy. Niezerowe warunki początkowe wynikają z włączenia od początku symulacji sinusoidalnie zmiennego niewyważenia wirnika. W zależności od fazy włączenia sygnału niewyważenia niezerowe będzie albo przemieszczenie albo prędkość drgań albo obie te wielkości naraz. Stąd mamy proces przejściowy na początku symulacji. Poddano więc przekształceniu FFT początek procesu symulacji, a wynikowe widmo przedstawione jest na rys. 4. Dzięki zastosowaniu dużej rozdzielczości FFT (4096 próbek) na zarejestrowanym widmie częstotliwościowym widać dodatkowe kombinowane rezonanse. Łatwo sprawdzić, że te rezonanse występują z częstościami (ω_s-Ω), (ω_s+Ω), (2Ω- ω_s), itd. oraz w pobliżu powyższych częstości, co a wynika z zastąpienia częstości ω_S przez częstości związane ze zmienioną sztywnością pękniętego wału.



Rys. 4. Częstotliwość widmowa pękniętego wirnika; widmo drgań przejściowych i ustalonych

Analizując widmo z rysunku 4 można zauważyć piki amplitudowe dla rezonansów kombinowanych. Niestety ich wartości nie są zbyt duże i istnieje obawa, że nie będą one rozróżnialne wśród szumu pomiarowego mającego miejsce w pomiarach drgań rzeczywistych maszyn wirnikowych. W kolejnym kroku wprowadzono więc różnicę pomiędzy widmami amplitud drgań wirnika dla pękniętegoi niepęknięto wału. Najpierw określono widmo dla niepękniętego wirnika (rys.5), które wyznaczono również dla początkowej fazy symulacji. Następnie odjęto charakterystykę amplitudową z rys. 5 od charakterystyki
z rys. 4. Różnicowa charakterystyka jest prezentowana na rys. 6.

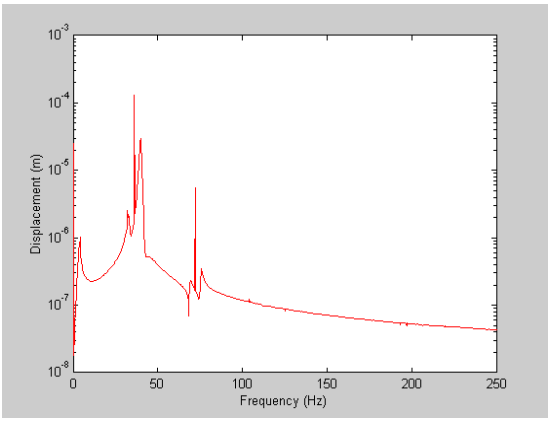


Rys. 5. Charakterystyka amplitudowa nie pękniętego wirnika

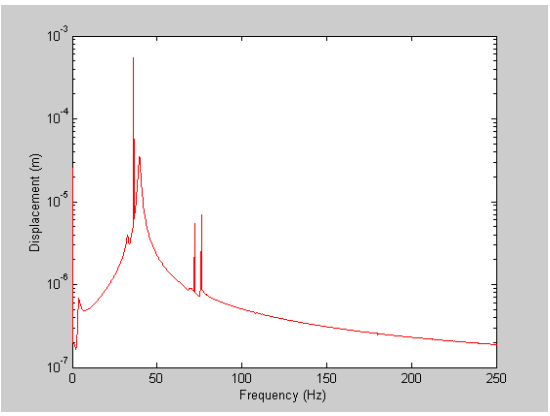
Okazuje się, że różnica widma amplitud uwypukla rezonanse kombinowane kosztem drgań od niewyważenia i rezonansu głównego. Rezonanse powinny być widoczne nawet w widmie zaszumianym.

6.2. Pobudzanie rezonansów kombinowanych wymuszeniem harmonicznym

Jako zewnętrzne wymuszenie przyjęto wymuszenie generowane przez dodatkowy wzbudnik. W dalszych rozważaniach tego rozdziału przyjęto, że wymuszenie zewnętrzne działa jedynie na kierunku osi *x* i ma przebieg harmoniczny. Jest to najczęściej obecnie wykorzystywany sygnał do celów diagnostyki pękania wirnika [5]. Sygnał ten będzie podawany z częstością rezonansów kombinowanych. Należy tu zauważyć, że wraz z zaawansowaniem pęknięcia zmienia się nieco częstotliwość, z którą zachodzi rezonans kombinowany, gdyż zmienia się sztywność wału. Dlatego należy uważnie przeanalizować widmo drganiowe wirnika zanim podda się go pobudzeniu wzbudnikiem.



Rys. 6. Różnica charakterystyk częstotliwościowo-amplitudowych

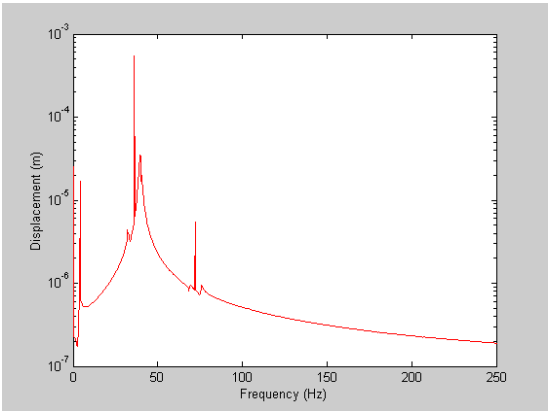


Rys. 7. Widmo drganiowe przy pobudzeniu rezonansu kombinowanego zachodzącego z częstością ($\Omega+\omega_s$=76Hz)

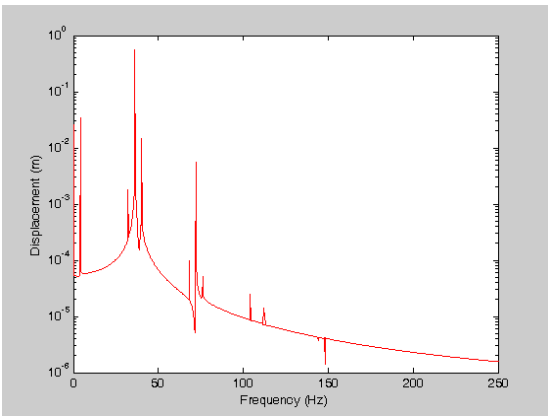
Do badań wykorzystano symulowany sygnał drgań ustalonych (uzyskany po 100 sekundach symulacji). Widmo drganiowe przy pobudzeniu rezonansu kombinowanego zachodzącego z częstością ($\Omega+\omega_s$=76Hz). przedstawia rys. 7, natomiast widmo drganiowe przy pobudzeniu ($|\Omega-\omega_s|=4$Hz) pokazane jest na rys. 8. Warto podkreślić, że w pierwszym przypadku mamy pomijalną zmianę wartości amplitudy drgań pękniętego wału w stosunku do drgań nie pękniętego wału, natomiast w przypadku pobudzania z częstotliwością równą 4 Hz mamy znaczący (około 10 dB) wzrost amplitudy drgań rezonansu kombinowanego. Ponieważ pobudzanie z tak niską częstotliwością jest możliwe przy pomocy różnych urządzeń, to ten rezonans kombinowany dla przykładowego wirnika wydaje się być najlepszym kandydatem do obserwacji diagnostycznej. Oczywiście konieczne są dalsze badania, aby ostatecznie potwierdzić ten wniosek.

6.3. Pobudzanie drgań funkcją chirp

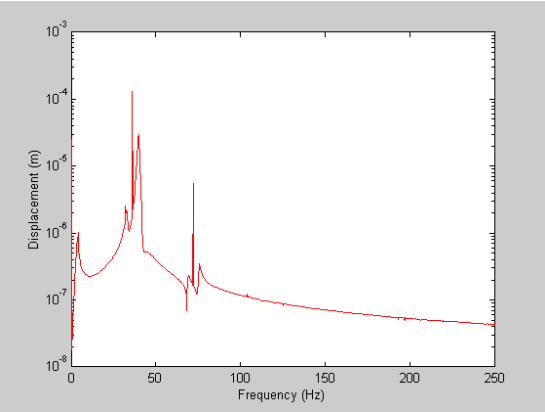
W przypadku pobudzenia funkcją harmoniczną jak już wspomniano należy dokładnie „wstrzelić się" w częstotliwość rezonansu kombinowanego. Tym samym, aby znaleźć tę częstotliwość należy pobudzić całe widmo drgań. Wykorzystamy do tego funkcję „*chirp*" z pakietu Simulink. Pobudzać się będzie drgania ustalone (po 100 sekundach od początku symulacji). Widmo tak pobudzonego pękniętego wirnika jest przedstawione na rys. 9.



Rys. 8. Widmo amplitudowe pękniętego wirnika pobudzonego sinusoidalnie wzbudnikiem z częstotliwością $|\Omega-\omega_s|=4Hz$



Rys. 9. Widmo amplitudowe pękniętego wirnika pobudzone funkcją „*chirp*"



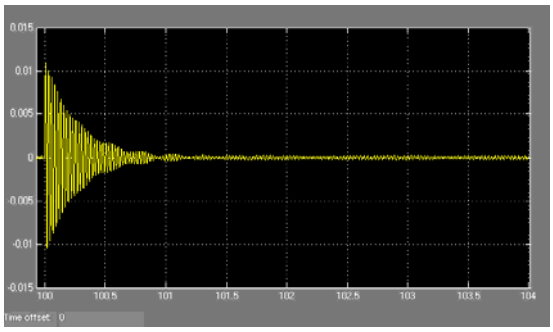
Rys.10. Różnica widm drganiowych pękniętego i niepękniętego wirnika pobudzanych funkcją *chirp.*

Można zauważyć daleko idące podobieństwo tego rysunku z rys. 4. Okazuje się więc że proces przejściowy zawiera tę samą informację diagnostyczną co widmo drgań ustalonych. Należy więc sprawdzić różnicę widma amplitudowego pękniętego i nie pękniętego wirnika. Różnica ta dla drgań ustalonych prezentowana jest na rys. 10.

Rysunek ten potwierdza podobieństwo informacji diagnostycznej zawartej w zarówno w procesie przejściowym jak i w widmie drgań ustalonych.

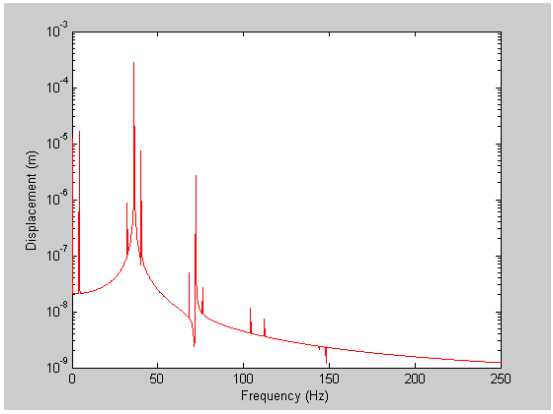
6.4. Impulsowe pobudzanie drgań przejściowych

Pobudzenie drgań impulsem nastąpiło po zaniku drgań przejściowych wywołanych włączeniem się sił bezwładności od niewyważenia. Po 100 sek. od początku symulacji wał został pobudzony w kierunku *x* impulsem siły, a przebieg drgań od chwili włączenia impulsu ma przebieg pokazany na rys. 11.



Rys. 11. Przebieg drgań od chwili włączenia impulsu.

Widmo tego procesu przejściowego pokazane jest na rys. 12. Jak z niego wynika jest ono podobne do widma z rysunku 4. Różnica widm pękniętego i niepękniętego wału zbudowana na drganiach swobodnych jest prawie identyczna z widmem z rys 6. Tym samym staje się oczywiste, że można zbudować układ diagnostyczny w oparciu o przebieg drgań swobodnych



Rys.12. Widmo procesu przejściowego

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule badano możliwości wykorzystania różnych pobudzeń w wibroakustycznej metodzie diagnostyki pękania wałów maszyn wirnikowych. Wprowadzenie różnicy sygnałów drganiowych wału przed i po uszkodzeniu owocuje istotnym wzrostem amplitudy drgań rezonansowych zachodzących z częstotliwościami rezonansów kombinowanych. Wskaźniki diagnostyczne można budować zarówno na bazie przekształcania drgań ustalonych jak i drgań swobodnych. Pobudzanie drgań swobodnych jest łatwiejsze od strony technicznej. Dlatego dalsze badania będą się koncentrowały na wykorzystaniu procesu przejściowego dla budowania systemu diagnostycznego.

LITERATURA

1. **Kiciński J.** (2006), *Rotor Dynamics*, Series, Vol. 28, IFFM Publisher, Gdańsk
2. **Gosiewski Z., Muszyńska A.** (1992), *Dynamika maszyn wirnikowych*, Wydawnictwo Uczelniane WSInż., Koszalin
3. **Sawicki J.T., Baaklini G.Y., Gyekenyesi A.L**. (2004), *Coupled Lateral and Torsional Vibrations of a Cracked Rotor*. Proc. ASME Turbo Expo 2004, Power for Land, Sea and Air, June 14-17, Vienna, Austria.
4. **Gasch R.** (1993), *A Survey of the Dynamic Behaviour of a Simple Rotating Shaft with Transverse Crack*, Journal of Sound and Vibrations, Vol.160, No 2, pp.313-332
5. **Quinn D.D., Mani G., Kasandra M.E.F., Bash T., Inman D.J., Kirk R.G.** (2005), *Damage Detection of a Rotating Shaft Using an Active Magnetic Bearing as a Force Actuator –Analysis and Experimental Verificaction*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.19, No 6,
6. **Gosiewski Z., Sawicki J.T.** (2007), *A new vibroacoustic method for shaft crack detection,* Proc. ISCORMA-4, Calgary, Alberta, Canada
7. **Gosiewski Z.** (1989), *Aktywne sterowanie drganiami wirników,* Wydawnictwo Uczelniane WSInż., Koszalin
8. **Mayes I.W.: Davis W.G.R.** (1884), *Analysis of the response of a multi-rotor-bearing system containing a transverse crack in a rotor,* Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Realiabilty in Design, Vol. **106**, No 1, pp.139-145.
9. **Penny J.E.T., Friswell M.I., Zhou Ch.** *Condition Monitoring of Rotating Machinery using Active Magnetic Bearings.*