

Piotr BIELAWSKI

Akademia Morska w Szczecinie

SYGNAŁY DRGANIOWE GENEROWANE UKŁADAMI SIŁ ZMIENNYCH I STAŁYCH

Słowa kluczowe

Diagnostyka drganiowa, sygnały drganiowe, siły generujące drgania, wnioskowanie diagnostyczne.

Streszczenie

W artykule uzasadniono przydatność i wykazano możliwość budowania relacji diagnostycznych w formie układ sił – obraz symptomów drganiowych. Zaproponowano wprowadzenie klasyfikacji relacji ze względu na typ układu sił wymuszających. Zbudowano modele rzeczywiste dwóch typów układu sił i przeprowadzono badania relacji układ sił wymuszających – widmo drgań. Badano układy wymuszeń:

- 1) siła o przebiegu sinusoidalnym + siła stała,
- 2) siła o przebiegu sinusoidalnym o częstotliwości ω_1 + siła stała + siła o przebiegu sinusoidalnym o częstotliwości ω_d ; $\omega_1 > \omega_d$.

Wyniki badań przedstawiono w formie amplitudowo-częstotliwościowych widm przyspieszeń drgań bezwzględnych.

Wprowadzenie

Sygnały drganiowe są wybranymi punktowymi obserwacjami realizowanych drgań wybranych elementów maszyn i urządzeń. Drgania elementów powstają pod działaniem wymuszeń – sił zmiennych co do wartości lub kierunku.

Miejsca pomiarów i sposoby pomiarów drgań elementów maszyn opisane są w normach [1, 2].

Sygnąły drganiowe wykorzystuje się w diagnozowaniu maszyn. Zakłada się, że wymuszenia siłowe działające na element, którego drgania generują, zależne są od obciążenia i stanu technicznego określonych elementów. Drgania mierzone na elementach nieruchomych mogą być generowane reakcjami od innych nieruchomych i ruchomych elementów oraz zmiennym polem magnetycznym. Mimo licznych publikacji z zakresu diagnostyki technicznej wnioskowanie na podstawie wartości miar symptomów o stanie technicznym jest często nieskuteczne. Trafność diagnozy zależna jest nie tylko od znajomości poszczególnych relacji diagnostycznych typu „zmiana stanu – zmiana miar symptomów drganiowych”, ale również od znajomości reguł powstawania wymuszenia wypadkowego działającego na element, którego drgania są sygnałem diagnostycznym. Wydaje się, że sposobem na podwyższenie trafności diagnozy jest wnioskowanie na podstawie miar sygnału drganiowego o układzie sił generujących drgania badanego elementu, a następnie na podstawie układu sił i innych informacji wnioskowanie o przyczynie powstałego układu sił.

1. Działania na sygnałach

Sygnał drganiowy w wybranym punkcie wybranego elementu jest odpowiedzią na wszystkie wymuszenia działające w chwili pomiaru na badany element. Poszukuje się reguł pozwalających na wyznaczenie wymuszeń z widma zmierzonych drgań.

Najprostszym wymuszeniem zmiennym okresowym jest siła o przebiegu sinusoidalnym. Odpowiedzią na takie wymuszenie jest sygnał drganiowy harmoniczny. Siły stałe co do wartości i kierunku nie generują sygnałów drganiowych. Z matematycznego punktu widzenia wymuszenia siłowe działające na dany element mogą się wzajemnie sumować lub mnożyć jedno przez drugie. Możliwe jest sumowanie wymuszeń zmiennych ze stałymi i wymuszeń zmiennych ze zmiennymi.

W przypadku dwóch sygnałów harmonicznych $A_1 \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$ i $A_d \cdot \cos(\omega_d t + \varphi_d)$ ich sumę i iloczyn można zapisać następująco [3]:

suma:

$$A_1 \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_d \cdot \cos(\omega_d t + \varphi_d) \quad (1)$$

iloczyn:

$$A_1 \cdot A_d \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \cdot \cos(\omega_d t + \varphi_d) = \frac{1}{2} A_1 A_d \{ \cos[(\omega_1 + \omega_d)t + (\varphi_1 + \varphi_d)] + \cos[(\omega_1 - \omega_d)t + (\varphi_1 - \varphi_d)] \} \quad (2)$$

Iloczynem dwóch sygnałów harmonicznych jest suma dwóch sygnałów harmonicznych o częstościach $\omega_1 \pm \omega_d$.

Jeżeli $\omega_1 \gg \omega_d$, to sumowanie sygnałów odpowiada nakładaniu się sygnałów, a mnożenie sygnałów jest tożsame z modulacją amplitudową jednego sygnału drugim sygnałem (modulacja amplitudowa o częstotliwości nośnej) [3].

Jeżeli fale (sygnały) mają zbliżone wartości częstotliwości to efektem sumowania wielu fal (sygnałów) są tzw. „paczki fal” [4]. Cechą charakterystyczną dla paczek fal jest powstawanie obwiedni sumy tych fal. Szczególnym przypadkiem paczek fal jest „dudnienie”. Dudnieniem [5] nazywa się zjawisko okresowych zmian amplitudy drgania wypadkowego powstałego z nałożenia dwóch drgań harmonicznnych o zbliżonych częstotliwościach. Amplituda dudnienia zmienia się w granicach $|A_1 - A_d| \leq A(t) \leq |A_1 + A_d|$.

Jeżeli $A_1 = A_d = A$, to wynikiem nakładania są drgania okresowe, lecz nieharmoniczne [5]:

$$A \sin(\omega_1 t) + A \sin(\omega_d t) = 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_d}{2} t\right) \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_d}{2} t\right) \quad (3)$$

Jeżeli $\omega_1 - \omega_d \ll \omega_1$, ω_d to drganie wypadkowe można rozwiązać jako drganie okresowe [5]:

$$A(t) \sin(\omega_s t) \quad (4)$$

gdzie:

$$\omega_s = \frac{\omega_1 + \omega_d}{2}, \quad A(t) = 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_d}{2} t\right).$$

2. Realizacje sił zależnych od stanu technicznego

Każda maszyna jest generatorem drgań. Obraz drgań danej maszyny znajdującej się w stanie zdatności jest wynikiem dających się ustalić wymuszeń. Możliwe jest dla każdej maszyny stworzenie modelu „powinno być” dla relacji wymuszenia – widmo drgań. Zmiany stanu technicznego elementów maszyn mogą skutkować powstaniem dodatkowych sił lub mogą modyfikować siły i momenty, które są przez te elementy przenoszone. Powstaje widmo drgań dla stanu „jest”. Dąży się do uzyskania na podstawie różnicy między „powinno być” i „jest” informacji o zaistniałych zmianach w wymuszeniach i przełożenia tych zmian na przyczyny (zmiany stanu). W maszynach siłą harmoniczną związaną ze stanem jest siła odśrodkowa będąca wynikiem niewyważenia resztkowego i uszkodzeń powodujących nierównomierny rozkład mas wirnika względem jego środka obrotu [6]. Siłami stałymi są składowe stałe siły reakcji w łożyskach wirników, siły wynikające ze współpracy dwóch wirników zarówno o osiach leżących w jednej linii, jak i osiach równoległych lub pod innym kątem: sprzęgła,

przekładnie cięgnowe, przekładnie zębate itp. Siły stałe zależą od przenoszonego przez wirniki momentu obrotowego oraz napięcia wstępnego między wirnikami, np. napięcia paska klinowego. Dodatkową siłą zmienną może być siła wynikająca ze współpracy dwóch wirników – np. (składowa zmienna siły międzyzębnej, drgania giętnie cięgieł itp. Niektóre z wymienionych sił mogą mieć skomplikowany przebieg czasowy, nie do końca zbadane relacje stan – przebieg siły i charakter sygnału impulsowego.

Na podstawie literatury tematu można przyjąć, że wymuszenia działające na badany element można w większości przypadków rozłożyć na wymuszenia o przebiegu sinusoidalnym i przyporządkować do jednego z kilku możliwych modeli wymuszeń.

Dokonano badań dwóch rzeczywistych modeli wymuszeń:

- siła stała + siła harmoniczna działające na wirnik
- stała + siła harmoniczna + dodatkowa siła harmoniczna działające na wirnik maszyny.

Odpowiedź na wymuszenia układem sił mierzono na obudowie łożyska wału wirnika (korpusie maszyny). Mierzono wartość skuteczną przyspieszeń drgań bezwzględnych za pomocą profesjonalnego sensora inteligentnego VIBROPORT 41 wyposażonego w piezoelektryczny przetwornik przyspieszeń AS-20. Zakres pomiarowy przetwornika AS-20 to 4 ... 10 000 Hz ($\pm 0,5$ dB) lub 1,5 ... 15 000 Hz (± 3 dB) [7]. Zaprezentowane w tekście widma są skanowanymi wydrukami z VIBROPORT 41.

Wartości drgań korpusu generowane układem sił zależą od własności mechanicznych (w tym sprężystych i tłumiących) elementów między miejscem działania układu sił i miejscem pomiaru drgań.

W modelach najczęściej stosuje się liniowe charakterystyki opisujące własności sprężyste i tłumiące, pomimo że w obiektach rzeczywistych obserwuje się nieliniowości. Stosuje się linearyzację wokół punktu pracy obiektu o własnościach nieliniowych, a stosowana charakterystyka jest słuszna tylko dla określonego zakresu zmian argumentu [8].

W dziedzinie częstotliwości własności mechaniczne obiektu opisane są za pomocą transmitancji $H(j\omega)$, a zależność między siłą wymuszającą $F(j\omega)$ i odpowiedzią w postaci drgań $X(j\omega)$ przyjmuje postać $X(j\omega) = F(j\omega)H(j\omega)$. Wymuszenie sinusoidalne o częstości ω_1 generuje sinusoidalną odpowiedź o częstości ω_1 , a w zakresie charakterystyki liniowej wartość amplitudy odpowiedzi jest proporcjonalna do wartości amplitudy wymuszenia i wartości argumentu transmitancji.

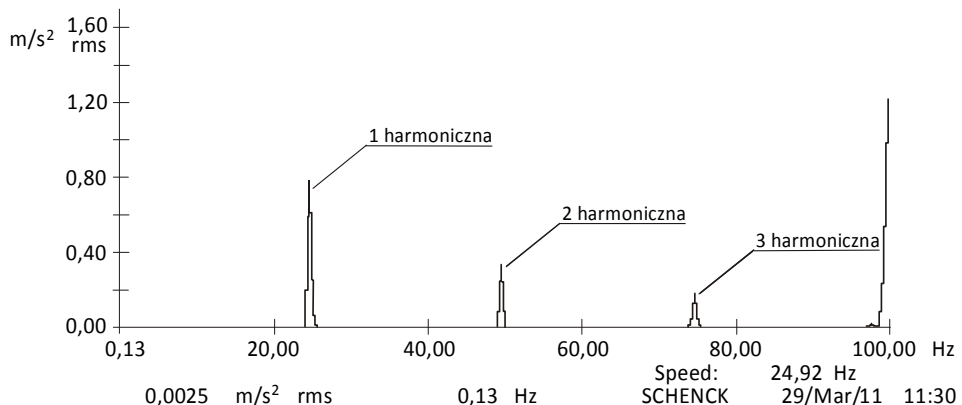
3. Siła stała + siła harmoniczna działające na wirnik

Sumą stałej siły i siły harmonicznej jest siła o wartości średniej równej wartości składowej stałej i amplitudzie równej amplitudzie składowej harmonicznej. Pojawienie się siły stałej skutkuje przesunięciem składowej harmonicznej częściowo w zakres nieliniowej charakterystyki drgającego obiektu. Odpowiedzią na wymuszenie harmoniczne nie jest już drganie o przebiegu sinusoidalnym. W widmie drgań można spodziewać się składowych będących wielokrotnością częstości wymuszenia sinusoidalnego.

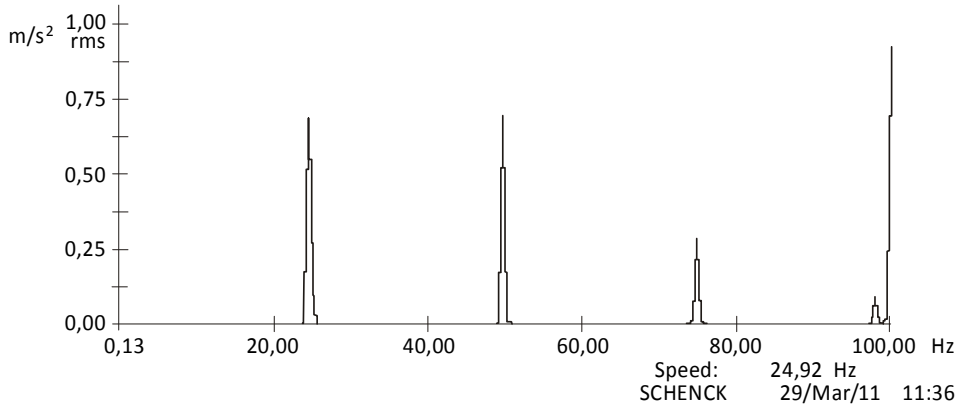
Celem badania wpływu siły stałej działającej na wirnik na drgania korpusu generowane siłą niewyważenia wirnika (siłą harmoniczną) przedłużono wał silnika elektrycznego i na koniec przedłużonego wału działano siłą stałą co do kierunku i wartości prostopadle do osi wału. Mierzono drgania w płaszczyźnie najbliższego łożyska w kierunku pionowym i sporządzono widmo drgań. Pomiar i analizy przeprowadzono dla różnych wartości stałej siły. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1. Otrzymane widma dla obciążenia 70, 90 i 110 N przedstawiono na rysunkach 1, 2, i 3.

Tabela 1. Zależność wartości amplitudy 1, 2, i 3 harmonicznej od wartości stałej siły poprzecznej

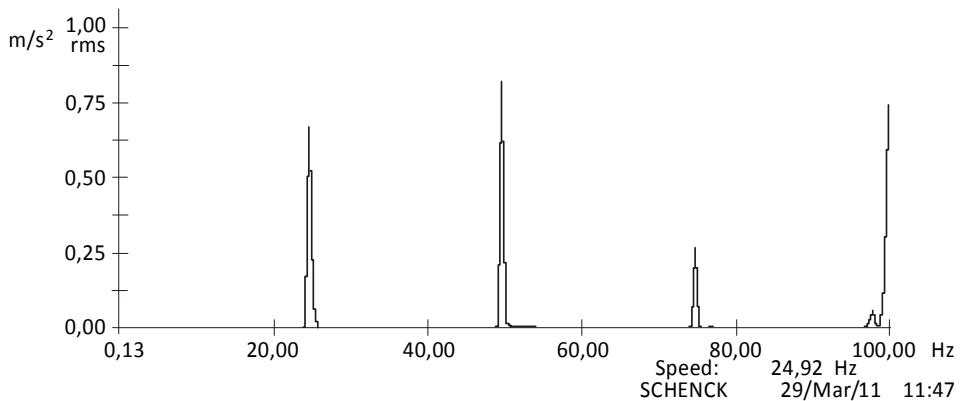
| Siła [N] | 1 harmoniczna [m/s ²] | 2 harmoniczna [m/s ²] | 3 harmoniczna [m/s ²] |
|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 50 | 0,78 | 0,20 | 0,21 |
| 70 | 0,78 | 0,34 | 0,18 |
| 90 | 0,68 | 0,69 | 0,29 |
| 110 | 0,67 | 0,82 | 0,26 |



Rys. 1. Widmo drgań dla stałej siły równej 70 N



Rys. 2. Widmo drgań dla stałej siły równej 90 N



Rys. 3. Widmo drgań dla stałej siły równej 110 N

Badania potwierdziły, że działanie stałej siły skutkuje pojawieniem się w widmie drgań dodatkowych składowych – 2 i 3 harmonicznej. Stwierdzono ponadto, że wraz ze wzrostem wartości stałej siły następuje znaczący wzrost wartości 2 harmonicznej i niewielki spadek wartości 1 harmonicznej. W badanym zakresie wzrost wartości 2 harmonicznej jest w przybliżeniu proporcjonalny do wzrostu wartości stałej siły.

4. Siła stała + siła harmoniczna + dodatkowa siła harmoniczna działające na wirnik maszyny

Na końcu wału silnika elektrycznego (silnika głównego) umieszczono w sposób nierozłączny tuleję z tarczą (tarcza główna). Na tulei zamocowano obrotowo drugą tarczę (tarcza dodatkowa). Druga tarcza zaopatrzona została

w koło pasowe do jej napędu drugim silnikiem (silnikiem dodatkowym). Mierzono drgania korpusu silnika głównego w kierunku pionowym w płaszczyźnie przechodzącej przez środek pierwszego łożyska. Sporządzono widma drgań dla następujących przypadków:

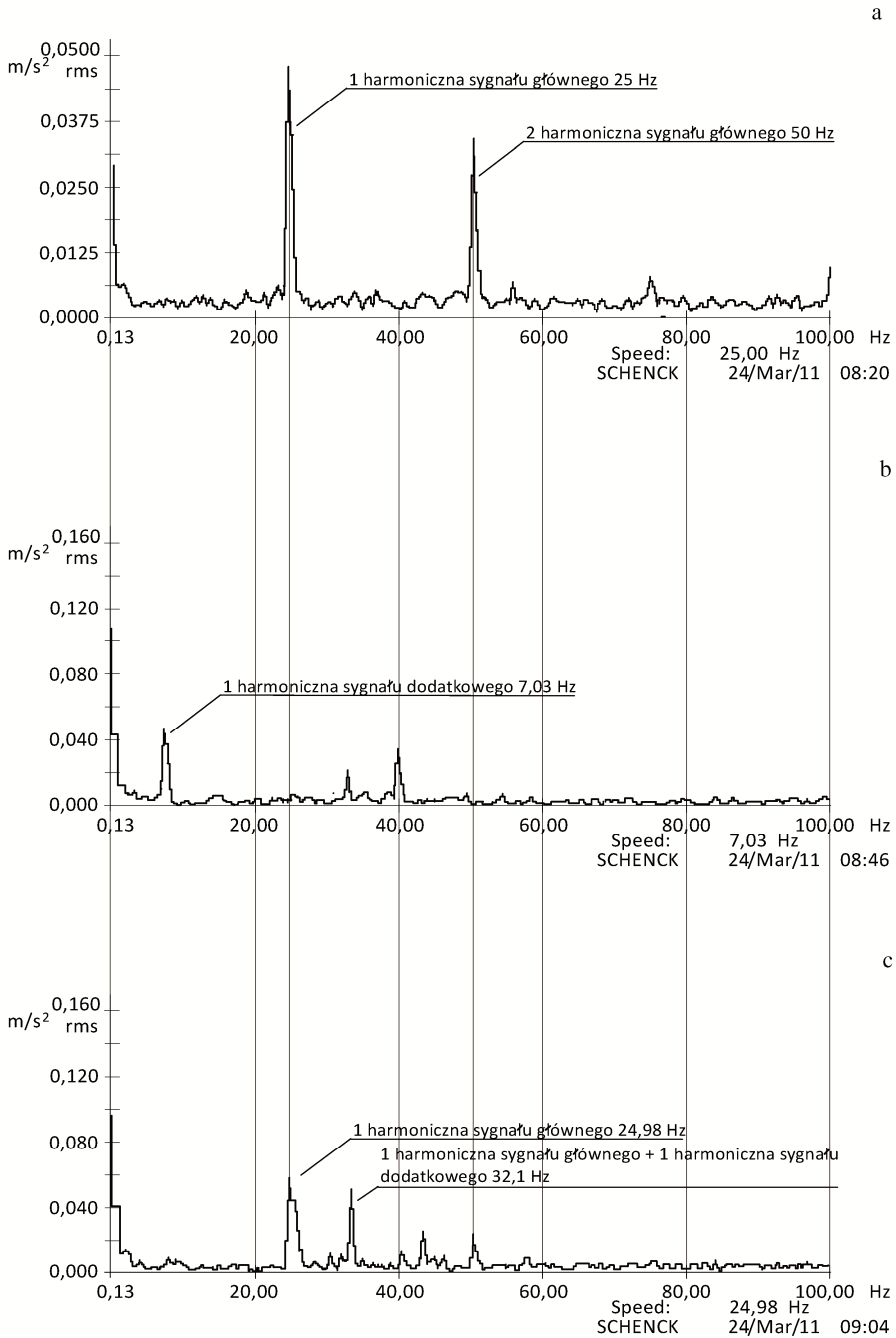
- rys. 4a: tarcza dodatkowa nieruchoma, wiruje wał silnika głównego wraz z główną tarczą,
- rys. 4b: tarcza główna i silnik główny nieruchome, wiruje tarcza dodatkowa na wale silnika głównego w kierunku zgodnym z kierunkiem obrotów tarczy głównej,
- rys. 4c: wiruje zarówno tarcza główna wraz z wałem silnika głównego, jak i tarcza dodatkowa z prędkością tak jak na rys. 4b,
- rys. 5a: tarcza główna i silnik główny nieruchome, wiruje tarcza dodatkowa na wale silnika głównego w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów tarczy głównej,
- rys. 5b: wiruje zarówno tarcza główna wraz z wałem silnika głównego, jak i tarcza dodatkowa z prędkością tak jak dla rys. 5a.

W widmie sygnału dla przypadku wirującego silnika głównego przy nieruchomej tarczy dodatkowej – w widmie sygnału głównego (rys. 4a) dominuje 1 harmoniczna o wartości proporcjonalnej do wartości siły niewyważenia oraz 2 harmoniczna o wartości zależnej od napięcia paska klinowego napędzającego dodatkową tarczę. Jest to przypadek działania sumy stałej siły i siły o przebiegu sinusoidalnym.

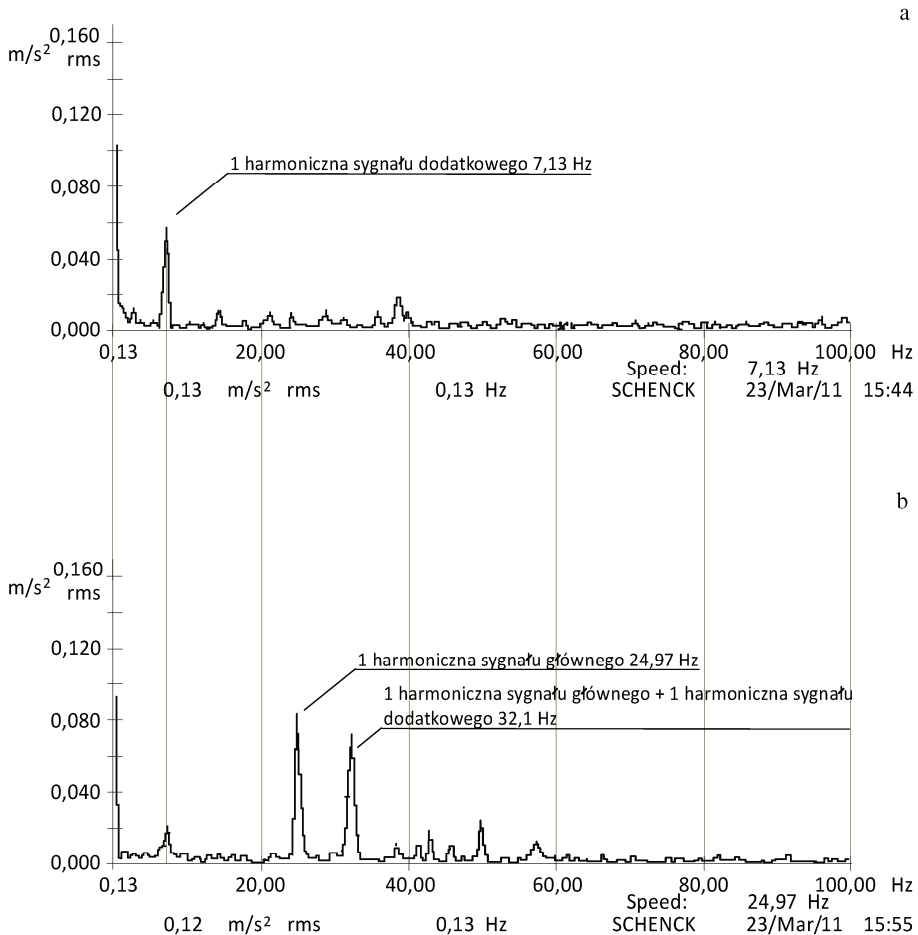
W widmie sygnału dla przypadku wirującej tarczy dodatkowej przy nieruchomej tarczy głównej (i nieruchomym wale silnika głównego) – widmie sygnału dodatkowego, rys. 4b i 5a, dominuje 1 harmoniczna (Hz) o wartości proporcjonalnej do siły generowanej niewyważeniem tarczy oraz składowe związane z drganiami giętymi i napięciem paska klinowego.

W widmie sygnału złożonego powstającego w przypadku wirowania obydwu tarcz z różnymi prędkościami dominują składowe o częstotliwości równej pierwszej harmonicznej sygnału głównego oraz składowa o częstotliwości będącej sumą częstotliwości 1 harmonicznej sygnału głównego i 1 harmonicznej sygnału dodatkowego. Zanika całkowicie (rys. 4c) lub pozostaje w szczątkowej postaci składowa o częstotliwości równej 1 harmonicznej sygnału dodatkowego (rys. 5b). Jest to przypadek działania jednej siły harmonicznej na drugą o innej częstotliwości. Wynikiem takiego działania jest nie w pełni ujawnione mnożenie jednego sygnału przez drugi lub nie w pełni ujawniona modulacja jednego sygnału drugim sygnałem.

Zależności identyczne do przedstawionych powyżej stwierdzono również po sporządzeniu odpowiednich widm prędkości drgań korpusu.



Rys. 4. Widma sygnałów: a – głównego b – dodatkowego c – złożonego (kierunek wirowania wymuszenia dodatkowego zgodny z kierunkiem wirowania wymuszenia głównego)



Rys. 5. Widma sygnałów: a – dodatkowego b – złożonego (kierunek wirowania wymuszenia dodatkowego przeciwny do kierunku wirowania wymuszenia głównego)

Wnioski

1. Suma siły stałej co do kierunku i wartości oraz siły zmiennej o przebiegu sinusoidalnym skutkuje powstaniem w widmie sygnału drganiowego elementu niewirującego 2-harmonicznej o wartości zależnej od wartości siły stałej.
2. Dwie działające na siebie siły zmienne o przebiegu sinusoidalnym o różnych częstotliwościach generują sygnał drganiowy o dwóch składowych: jednej o częstotliwości siły o wyższej częstotliwości, drugiej o częstotliwości będącej sumą częstotliwości obydwu sił.

3. W procesie wnioskowania diagnostycznego możliwe i celowe jest sprawdzanie relacji diagnostycznych do wpływu stanu technicznego na siły skutkujące powstawaniem złożonego sygnału drganiowego.

Bibliografia

1. PN-ISO 7919-1 Drgania mechaniczne maszyn z wyłączeniem maszyn tłokowych. Pomiary drgań wałów wirujących i kryteria oceny. Część 1: Wytyczne ogólne. Marzec 2001.
2. PN-ISO 10816-1 Drgania mechaniczne – Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących – Arkusz 1: Wytyczne ogólne. Styczeń 1998.
3. Kenuhl T.: Zustandsdiagnose an Kreiselpumpen anhand instationärer Schwankungen der Motorstromaufnahme. Dissertation, Braunschweig 1999.
4. Orear J., Fizyka, tom 2. WNT, Warszawa 1993.
5. Encyklopedia techniki. Podstawy techniki. WNT Warszawa 1994.
6. PN-93/N-01359 Drgania mechaniczne. Wyważanie wirników sztywnych. Wyznaczanie dopuszczalnego niewyważenia resztkowego.
7. Bedienungsanleitung VIBROPORT 41. Version 1.5. Carl Schenck Darmstadt
8. Kucharski T.: System pomiaru drgań mechanicznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.

Recenzent:

Wojciech BATKO

Vibration signals generated by matching alternate and constant forces

Key words

Vibration diagnostics, vibration signals, forces that generate vibration, diagnostic inference.

Summary

The links between the technical condition of machines and the forces that generate the vibrating signals are highlighted. The sum and the product of two sinusoidal signals are presented, and the amplitude modulation is distinguished. The usefulness and capability of the construction of the diagnostic relationship between this match of forces and the image of vibration symptoms are substantiated. An introduction of the classification of the diagnostic relationships from the point of view of the type of matching forces is suggested. Two real models

of matching forces are built, and the diagnostic relationship between the matching forces and vibration spectra is investigated.

The following matches of forces are researched:

1. Sinusoidal force + stationary force, and
2. Sinusoidal force with frequency ω_1 + stationary force + sinusoidal force with frequency ω_d ; $\omega_1 > \omega_d$.

The results of research are presented in the form of described amplitude-frequency spectra.