

### 3.5.4. Analiza widmowa i kinematyczna w diagnostyce WA

Drugi poziom badań diagnostycznych, podejmowany wtedy, kiedy maszyna wchodzi w okres przyspieszonego zużycia, dotyczy lokalizacji i określenia stopnia zaawansowania poszczególnych uszkodzeń. Możliwości takie dla maszyn prostych stwarza połączenie analizy składu częstotliwościowego drgań z kinematyką maszyny lub zespołu (patrz rozdz.2). Zanim jednak do tego dojdziemy, zwróćmy uwagę na fakt naturalnego związku między amplitudą skuteczną procesu  $\tilde{u}(\theta)$ , a jego gęstością widmową moc  $G_{uu}(f,\theta)$ . Z twierdzenia Parsewala [73] wynika mianowicie relacja:

$$\tilde{u}(\theta)^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t, \theta)^2 dt = \int_0^\infty G_{uu}(f, \theta) df, \quad (3.52)$$

gdzie:

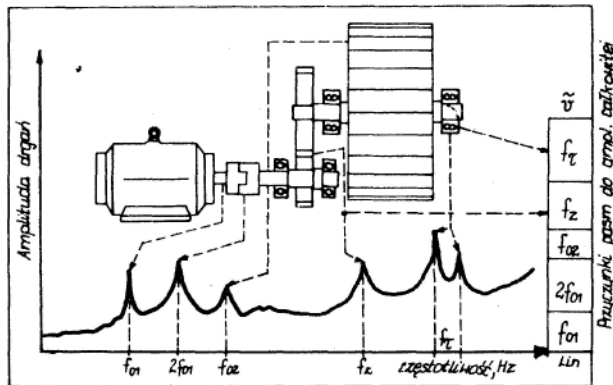
$$G_{uu}(f, \theta) = E_N \left\{ \frac{|U_i(f, \theta)|^2}{T} \right\}, U_i(f, \theta) = \int_0^T u_i(t, \theta) \exp(-2\pi jft) dt,$$

$u_i(t, \theta)$  są T- odcinkowymi realizacjami procesu  $u(t, \theta)$  o licznosci  $i = 1, \dots, N$ ;  $E_N(\cdot)$  - jest operatorem średniowania po tym zbiorze,  $U_i(f, \theta)$  - transformatą Fouriera realizacji, a wymiar gęstości widmowej jest

$$[G_{uu}(f, \theta)] = [u]^2 / \text{Hz}, j = \sqrt{-1}$$

Z powyższego wynika, że amplituda skuteczna jest sumą (całką) wszystkich przyczynków widmowych od każdej elementarnej składowej o częstotliwości  $\Lambda f \in (0, \infty)$ .

W rozdziale 2 omówiliśmy sposób generacji zjawisk WA i ich charakter widmowy. Syntetycznym podsumowaniem tego stanu wiedzy jest tabela 3.2, podająca najważniejsze składowe procesów TWA w relacji do częstotliwości obrotowej  $f_0$ . Dalsze dane i bardziej szczegółowe niejednokrotnie można znaleźć w karcie diagnostycznej zamieszczonej w dodatku.



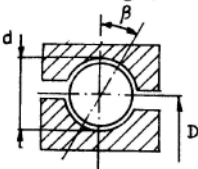
Rys.3.31. Obraz widmowy drgań elementów maszyny prostej i przyczynki widmowe do całkowitego poziomu w zakresie liniowym-Lin

Sposób posługiwania się wiedzą zawarta w tabeli i ideę sumowania przyczynków drganiowych wg wzoru (3.52) przedstawia rysunek 3.31, gdzie, jak widać, prawie każdy wirujący element prostej maszyny ma swój obraz widmowy i należy przyczynki do całkowitej amplitudy prędkości skutecznej  $\tilde{v}$  (z prawej strony rysunku). W ten sposób następuje połączenie wiedzy z kinematyki i dynamiki maszyn przyporządkowując każdemu elementowi wirującemu jemu należy przyczynki widmowe, przez co możliwa jest identyfikacja zaawansowania zużycia. Identyfikacja taka jest prawie oczywista z danych zamieszczonej na rysunku 3.32, [128], gdzie najbar-

T a b e l a 3.2

Składowe widmowe drgań związane z występowaniem defektów w elementach maszyn w porównaniu z częstotliwością obrotów [7],

$$f_0, \frac{\text{obrotów}}{\text{sekundę}}$$

Opis defektu	Dominująca częstotliwość drgań	Kierunek drgań	U w a g i
Niewyważenie wirującego elementu	$- 1 \times f_0$	Radialny	Powszechna przyczyna drgań w maszynach. Amplituda proporcjonalna do niewyważenia.
Nieosiowość lub zgięcie wału	$- 1 \times f_0$ $- \text{zwykle } 2 \times f_0$ $3 \times f_0$	Radialny osiowy	Jeżeli amplituda składowej $2f_0$ (osiowej) przekracza 75% składowej $f_0$ , to uszkodzenie takie może spowodować awarię maszyny.
Uszkodzony element łożyska tocznego	- impulsy o częstotliwościach związanych z obrotami i rodzajem uszkodzonego elementu - także drgania w paśmie wysokich częstotliwości (20kHz-60kHz)	Radialny oraz osiowy	<p>Częstości impulsów związane z defektem:</p> <p><math>\beta</math> - kąt działania,  <math>n</math> - liczba elementów tocznych  <math>f_r</math> - względna częstotliwość obrotowa bieżni w (Hz) (wewnętrzna bieżnia względem zewnętrznej).</p>  <p>Bicie bieżni lub wału  <math>f = f_r</math></p> <p><math>d</math> - średnica elementu tocznego,  <math>D</math> - średnica podziałowa.  Defekt bieżni zewn.  <math>f = \frac{n}{2} f_r (1 - \frac{d}{D} \cos \beta)</math>, Hz</p> <p>Defekt bieżni wewn.  <math>f = \frac{n}{2} f_r (1 + \frac{d}{D} \cos \beta)</math>, Hz</p> <p>Defekt 1 elem. tocznego  <math>f = \frac{D}{d} f_r [1 - (\frac{d}{D})^2 \cos^2 \beta]</math></p> <p>Bicie, luzy koszyka  <math>f = \frac{1}{2} f_r (1 - \frac{d}{D} \cos \beta)</math>, Hz</p>

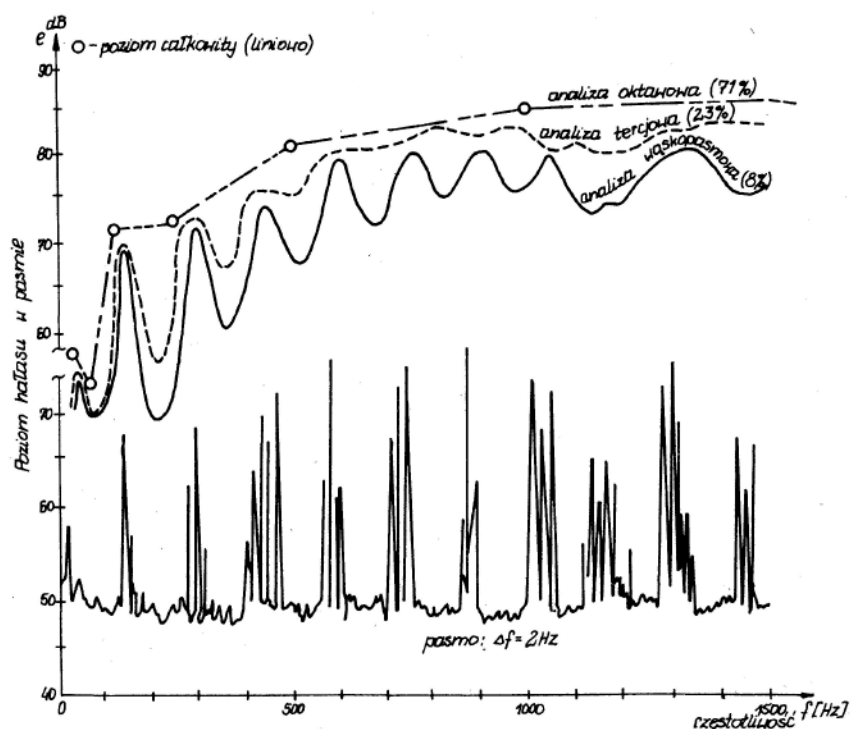
c.d. tabeli 3.2

Opis defektu	Dominująca częstotliwość drgań	Kierunek drgań	U w a g i
luz w osadzeniu łożyska ślizgowego	- $1/2 f_0$ ; $1/3 f_0$ subharmoniczne obrotów	Radialny	Luzy takie dochodzą do głosu tylko przy ustalonych obrotach i ustalonej temperaturze (np.: w turbogeneratorach).
Niestabilność filmu olej. w łożysku ślizgowym (wir olejowy, rezonansowy wir histerezowy)	od 0,20 do $0,48 \times f_0$	Głównie radialny	Zawsze mniej niż $1/2 f_0$ . Często występuje w maszynach i turbinach wysokoobrotowych.
Zniszczone lub zużyte przekładnie zębate	- $n \times f_0$ - $z \times f_0$ - oraz harmoniczne: n - ilość obrotów, - z - liczba zębów	Radialny i osiowy	Wstęgi boczne wokół częstości zazębienia świadczą o mimośrodowości kół zębatych (wykrywalne tylko za pomocą analizy wąskopasmowej $\Delta f = \text{const}$ ).
Luzy w parach obrotowych, luzy w posadowieniu	- $1 \times f_0$ - $2 \times f_0$	Radialny albo osiowy	Zwykle w połączeniu z niewyważeniem i niewspółosowością.
Uszkodzony pas napędowy	- $1 \times f_0$ -pasa - $2 \times f_0$ " - $3 \times f_0$ " - $4 \times f_0$ "	Radialny	Uszkodzenie to łatwo wykryć w świetle stroboskopu.
Niezerównoważone siły i momenty w ruchu postępowo-zwrotnym	- $1 \times f_0$ - oraz wyższe harmoniczne zależne od rzędu niewyważenia	Głównie radialny	Nierozłącznie związane z działaniem maszyny. Mogą być jedynie zmniejszone przez zmiany konstrukcyjne bądź wibroizolację.
Pulsacje czynnika roboczego	- $f_0 \times$ liczba łopatek, cylindrów itp. - oraz wyższe harmoniczne	Radialny i osiowy	W przypadku koincydencji z rezonansami konstrukcji mogą być przyczyną uszkodzeń.
Drgania maszyn elektrycznych prądu zmiennego	- 1 lub $2 \times$ częstotliwość zasilania w sieci elektrycznej	Radialny i osiowy	Powinny zaniknąć po wyłączeniu prądu zasilania.



ceny jego zaawansowania należy obserwować cząstkowe krzywe odpowiednich składowych widmowych. Widać więc, że przez pomiar jest tu możliwa diagnoza, geneza i prognoza stanu maszyny i podzespołów.

Jak widać z powyższego analiza widmowa drgań maszyn prostych w powiązaniu z analizą kinematyczną może oddać nieocenione usługi. Stąd też warto przyjrzeć się bliżej instrumentalnym cechom analizy widmowej jako eksperymentalnego przybliżenia definicji (3.5). Rysunek 3.34 [74] przedstawia cztery typy analiz tego samego zjawiska w paśmie 0:1500 Hz za pomocą analizatora oktawowego  $\Delta f / f = 0,71$ , tercjowego  $\Delta f / f = 0,231$ , wąskopasmowego o stałej względnej szerokości pasma  $\Delta f / f = 0,08 = 8\%$  oraz

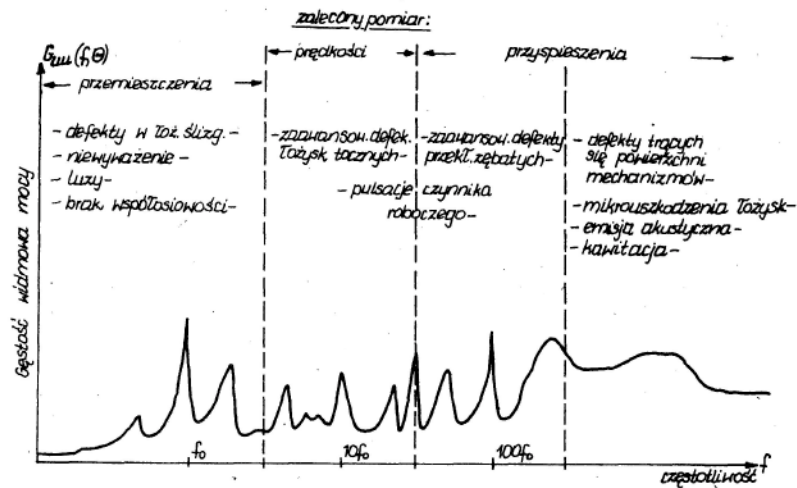


Rys.3.34. Widmo hałasu łożyska tocznego uzyskane za pomocą różnych analizatorów [74]

wąskopasmowego o stałej szerokości pasma  $\Delta f = 2$  Hz (analizy tego samego typu możliwe są do uzyskania również komputerowo). Jak widać z rysunku, analiza oktawowa jest tu prawie nieprzydatna, podobnie jak analiza tercjowa dla wyższych częstotliwości. Z kolei analiza wąskopasmowa  $\Delta f = 2$  Hz jest zbyt szczegółowa pokazując elementy analizy, co do których nie mamy możliwości przyporządkowania przyczynowo-skutkowego. Optymalna jest tutaj (w większości przypadków w diagnostyce) analiza wąskopasmowa  $\frac{\Delta f}{f} = 7 \div 10\%$ , na której widać

szegóły kinematyczne widma jednak bez szczegółów subtelnej struktury widma.

Na zakończenie rozważań przydatności analizy widmowej w diagnostyce warto przeanalizować syntetyczny rysunek ujawniania się uszkodzeń w skali częstotliwości (rys.3.35). Generalnie można powiedzieć, że pasmo do kilku  $f_0$  (zalecany pomiar przemieszczenia) ujawnia uszkodzenia związane z obrotem podstawowym - technologicznym; pasmo od kilku  $f_0$  do kilkuset  $f_0$



Rys.3.35. Widmo przyspieszenia drgań hipotetycznej maszyny z zaznaczeniem pasm charakterystycznych dla różnych grup uszkodzeń w funkcji częstotliwości obrotowej  $f_Q$  [7]

ujmuje uszkodzenia związane z dyskretyzacją ruchu podstawowego: łożyska, zazębienia, pulsacje łopatkowe; wreszcie pasmo powyżej kilkuset  $f_Q$ , to pasmo mikro zjawisk TWA: kavitacji, tarcia, emisji akustycznej itp. Wykres ten warto mieć przed oczyma, zastanawiając się nad wyborem pasma obserwacji i najlepszej wielkości pomiarowej.