

### 3.5.3. Specjalne estymaty punktowe procesów WA

Podane w poprzednim rozdziale definicje amplitud procesów WA są w istocie momentami modułu stacjonarnego i ergodycznego procesu przypadkowego  $u(t)$ , (patrz np. [51]). Ten sposób patrzenia na pomiar amplitudy procesu WA można uogólnić otrzymując amplitudę  $q$ -tego rzędu jako  $q$ -ty pierwiastek z momentu  $q$ -tego rzędu procesu WA [67]\*

$$\bar{u}_q = \left[ \int_{-\infty}^{\infty} |q|^q p(u) du \right]^{1/q} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)|^q dt \right]^{1/q} = \sqrt[q]{E_t |u(t)|^q} \quad (3.48)$$

gdzie  $p(u)$  jest gęstością prawdopodobieństwa rozkładu amplitud procesu  $u(t)$ , zaś definicja w dziedzinie czasu jest ważna dla procesów ergodycznych i stacjonarnych.

Przyjrzawszy się powyższej definicji w dziedzinie czasu i amplitud oraz definicjom (3.42-44) można znaleźć, że dla  $q = 1$  mamy amplitudę średnią (3.42) dla  $q = 2$  - amplitudę skuteczną (3.43), dla  $q \rightarrow \infty$  amplitudę szczytową (3.44), (bliżej patrz [7], rozdz. 3.9.1).

Jak można wywnioskować z prezentowanych w poprzednim rozdziale danych nadzoru diagnostycznego i z modelu TWA, kwestią dyskusyjną jest zawsze wartość bezwzględna poziomu wyjściowego drgań maszyny nowej lub po remoncie. Odchodząc od tego problemu zdefiniowano liczbowe miary bezwymiarowe procesów WA, które ogólnie można wyrazić w postaci:

$$\zeta = \frac{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} |u|^q p(u) du \right]^{1/q}}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} |u|^m p(u) du \right]^{1/m}} \quad (3.49)$$

Znaczenie tej ogólnej estymaty bezwymiarowej dla niektórych wartości  $q$  i  $m$  jest następujące:

$$K = \frac{\tilde{u}}{\bar{u}} = \text{współczynnik kształtu dla } q = 2, m = 1,$$

$$C = \frac{\hat{u}}{\tilde{u}} = \text{współczynnik szczytu dla } q \rightarrow \infty, m = 2,$$

(3.50)

$$I = \frac{\hat{u}}{\tilde{u}} = \text{współczynnik impulsowości dla } q \rightarrow \infty, m = 1,$$

$$m = 1$$

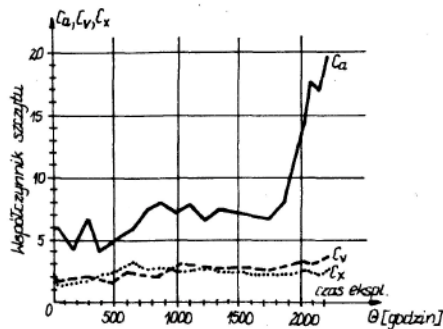
$$L = \frac{\hat{u}}{u_{1/2}} = \text{współczynnik luzu dla } q \rightarrow \infty, m = 1/2$$

\*)w punkcie tym dla wygody opuścimy czas  $\theta$  w oznaczeniach procesu  $u(t)$ .

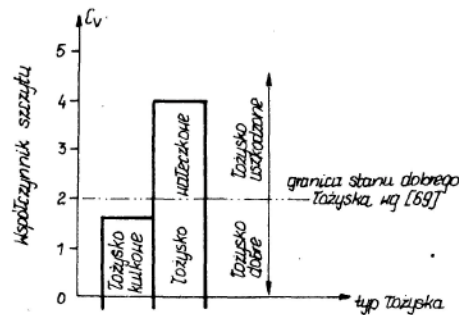
$$\sqrt[4]{\beta} = \text{pierwiastek czwartego stopnia z kurtozy } \beta \\ \text{dla } q = 4, m = 2.$$

Współczynnik kształtu  $K$  ma bardzo małą wrażliwość na zmiany stanu, natomiast współczynnik luzu  $L$  trudno jest mierzyć dla  $m = 1/2$ . Pozostałe współczynniki

znajduję zastosowanie w diagnostyce łożysk tocznych i przekładni. Omawiając je kolejno weźmy wpierv pod uwagę współczynnik szczytu  $C$  łatwy do uzyskania pomiarowo. Rysunek 3.26 pokazuje porównanie wrażliwości diagnostycznej współczynnika szczytu przyspieszeń  $C_a$ , prędkości  $C_v$ , przemieszczeń  $C_x$  drgań obserwowanych na obudowie łożyska tocznego silnika elektrycznego [67].



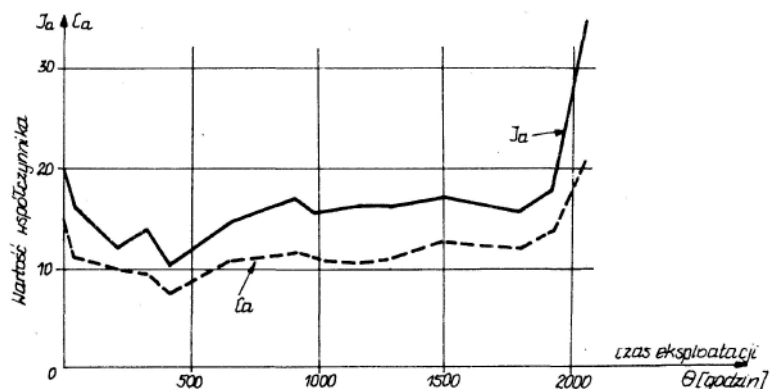
Rys.3.26. Eksploatacyjny trend zmian współczynników szczytu przyspieszenia  $C_a$ , prędkości  $C_v$  i przemieszczenia drgań  $C_x$  obudowy łożyska silnika elektrycznego małej mocy [67]



Rys.3.27. Współczynniki szczytu prędkości drgań  $C_v$  dla łożyska kulkowego i wałeczkowego silnika elektrycznego dużej mocy [69]

Jak widać z rysunku, współczynnik szczytu przemieszczeń  $C$  nie ma żadnych własności diagnostycznych,  $C_v$  - ma niewielkie, natomiast  $C_a$  doskonale zdaje sprawę ze stanu technicznego łożyska i można by tu zaproponować  $C_a = 10$  jako granice stanu dobrego łożyska. Dla łożysk tocznych o większych gabarytach i obciążeniu współczynnik szczytu prędkości  $C_v$  ma również znaczenie diagnostyczne. Ostatnio Andrzejewski [69,70] donosi o dwu przypadkach prawidłowej oceny łożyska silnika agregatu pompowego podając, że posługiwał się wartością krytyczną  $C_v = 2$  (patrz rys.3.27).

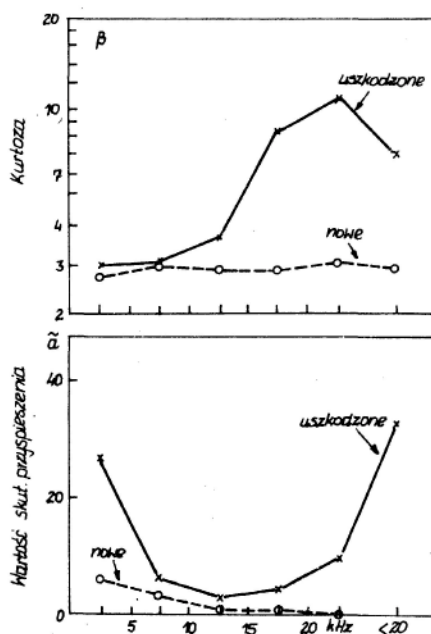
Współczynnik impulsowości  $I$  ma podobne własności diagnostyczne, a ponadto cechuje się większą wrażliwością. Potwierdzenie tego faktu można znaleźć na rysunku 3.28 z badań na silniku elektrycznym małej mocy. Tutaj dla lepszego uchwycenia zmian i pozbycia się zakłóceń zastosowano wstępną filtrację za pomocą filtru oktawowego 8 kHz.



Rys.3.28. Eksploatacyjny trend współczynników impulsowości  $I_a$  oraz szczytu  $C_a$ , w oktawie 8kHz, dla drgań obudowy łożysk silnika elektrycznego małej mocy [67]

Wstępna filtracja stosowana jest również z powodzeniem przy pomiarze kurtozy  $\beta$  przy ocenie stanu łożysk tocznych. Jak się okazuje z badań Dyera [71], wartość kurtozy  $\beta$  łożysk nowych zawiera się w granicach  $\beta = 3 \div 4$ , natomiast dla łożysk uszkodzonych  $\beta = 10 \div 20$ . Prawidłowość ta utrzymuje się w szerokich granicach obrotów i gabarytów łożysk. Rysunek 3.29 pokazuje porównawcze zachowanie się amplitudy przyspieszenia i jego kurtozy dla drgań łożyska, w pięciu pasmach  $\Delta f = 5$  kHz i szóstym ostatnim  $\Delta f < 20$  kHz.

Rys.3.29. Porównanie wartości kurtozy  $\beta$  i przyspieszenia skutecznego a drgań obudowy łożyska w sześciu



pasmach z  $\Delta f = 5$  kHz [72]

Jak widać z rysunku, wartość kurtozy  $\beta$  w paśmie szóstym dla  $f < 20$  kHz i łożyska uszkodzonego spada istotnie, podczas gdy pasma  $\Delta f = 5$  kHz przy 17,5 kHz i 22,5 kHz mają nadal dużą wartość kurtozy. Wskazuje to na istotną rolę filtracji w badaniach diagnostycznych, ponieważ definicja kurtozy oparta jest na gęstości rozkładu  $p(u)$ , to można rzec, że w paśmie  $\Delta f > 5$  kHz gęstość rozkładu  $p(u)$ , a co za tym idzie i kurtozy  $\beta$ , traci swoje właściwości zorientowania uszkodzeniowego zbliżając się do wartości małych charakterystycznych dla rozkładów typu Gausso-podobnego.

Tyle w sposób bardzo skrótowy o specjalnych estymatach definiowanych w dziedzinie amplitudy procesu WA, resztę można znaleźć w monografii [7] i nowszych pracach naukowych i stosowanych z tej dziedziny. Estymaty punktowe mogą być również definiowane w dziedzinie częstotliwości, jak to pokazano w cytowanej już pracy [68] i rozwinięto w monografii [7]. Przytoczmy tu dwie estymaty widmowe; częstotliwość Rice'a procesu  $u(t)$  oznaczoną  $f_u$  oraz wskaźnik harmoniczności  $H_u$ . Jeśli oprócz procesu oryginalnego  $u(t)$  zdefiniujemy proces różniczkowy

$U^{(1)}(t) = \frac{du}{dt}$  i całkowy  $u^{(-1)}(t) = \int_0^t u(\tau) d\tau$  - to wspomniane wyżej estymaty można zdefiniować

następująco:

$$f_u = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\int_0^\infty f^2 G_{uu}(f) df}{\int_0^\infty G_{uu}(f) df} \right]^{1/2} = \frac{(\tilde{u}^{(1)})}{2\pi\tilde{u}}$$

(3.51)

$$H_u = \frac{f_u}{f_u^{(-1)}} = \frac{(\tilde{u}^{(1)})(\tilde{u}^{(-1)})}{\tilde{u}^2},$$

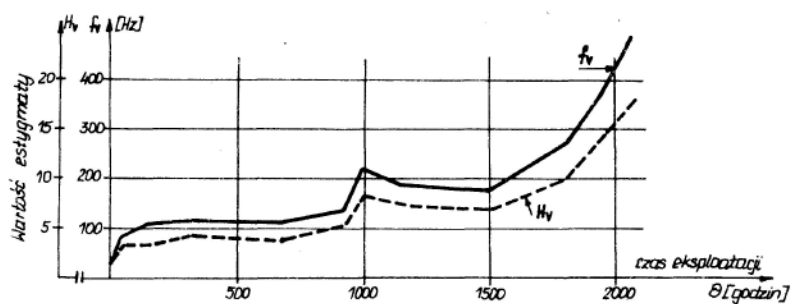
gdzie  $(\tilde{\cdot})$  oznacza wartość skuteczną procesu w nawiasie.

Jak widać z zapisu definicji (3.51), wielkości te można również obliczać mierząc amplitudę skuteczną procesów różniczkowo-całkowych np.  $u(t)$ . Konkretnie zaś, jeśli proces oryginalny jest prędkością drgań  $u(t) = v(t)$ , to mierząc przyspieszenie  $a(t) = u^{(1)}(t)$  oraz przemieszczenie  $x(t) = u^{(-1)}(t)$ , możemy obliczyć wartości częstotliwości Rice'a i wskaźnika harmoniczności. Interpretacja fizyczna częstotliwości Rice'a wskazuje na średnią częstotliwość pasma, zaś jeśli  $\Delta f \rightarrow 0$ , jak dla procesu harmonicznego, to  $f_u$  jest jego rzeczywistą częstotliwością. Wskaźnik harmoniczności natomiast wskazuje bezwymiarowo na szerokość pasma zajmowanego przez proces, jako że dla harmoniki  $H_u = 1$ , zaś dla białego szumu  $H_u \rightarrow \infty$ .

Zastosowanie diagnostyczne tych wielkości może być wielorakie, gdyż bez analizy widmowej możemy uzyskać informację o średniej częstotliwości procesu drganiowego  $f_v$  i szerokości zajmowanego pasma  $H_v$  jeśli zmierzmy skuteczne wartości przemieszczenia  $\tilde{x}$ , prędkości  $\tilde{v}$  i przyspieszenia

$\tilde{a}$ . Wtedy bowiem  $f_v = \frac{\tilde{a}}{2\pi\tilde{v}}$ ,  $H_v = \frac{\tilde{x} \cdot \tilde{a}}{\tilde{v}^2}$ . Można np. tylko z

pomiaru  $\tilde{v}$  i  $\tilde{a}$  sądzić bez analizy widmowej, czy zanotowany wzrost amplitud drgań wystąpił z powodu wzrostu nie wyrównoważenia, jeśli wyliczone stąd  $f_v \sim f_0$ , czy też np. z tytułu uszkodzenia łożyska, przekładni itp., jeśli  $f_v \gg f_0$  ( $f_0$ - częstotliwość obrotowa maszyny). Estymaty te mogą znaleźć również zastosowanie w diagnostyce łożysk tocznych, o czym świadczy rysunek 3.30, gdzie w miarę pogarszającego się stanu łożyska tocznego obie wielkości zachowują się podobnie.



Rys.3.30. Dyskryminanty częstotliwościowe  $f_v$ ,  $H_v$  dla drgań obudowy łożyska silnika elektrycznego małej mocy [67]

Widać tu, jak średnia częstotliwość procesu rośnie od częstotliwości magnetostrykcji obudowy silnika ( $f \cong 100$  Hz) wykazując pierwsze mikro uszkodzenia w łożysku dla  $Q = 1000$  godzin ( $f_v \cong 200$  Hz) z narastające ich liczbą w miarę wzrostu  $\theta$ . Wskaźnik harmoniczności  $H_v$  rośnie tu podobnie od wartości  $H_v = 5$  do  $H_v = 20$ , wskazując na czterokrotne poszerzenie pasma procesu drganiowego silnika z tytułu uszkodzenia łożyska tocznego.

Wyżej zdefiniowaliśmy i pokazaliśmy zastosowanie specjalnych miar procesów WA, przy czym niektóre z nich, np. kurtoza  $\beta$ , mają charakter uszkodzeniowo-zorientowany. Estymaty bezwymiarowe, takie jak: współczynnik szczytu  $C$ , impulsowości  $I$ , kurtoza  $\beta$ , wskaźnik harmoniczności  $H_v$ , mają tu specjalną wagę, jako że ich poziom znamionowy dotyczy stanu obiektu, a nie jego typu, np.  $\beta = 3 \div 10$  dla łożysk w dobrym stanie niezależnie od miejsca ich instalacji.

Nie zawsze jednak złożoność sygnałów WA jest tak mała jak w powyższych przypadkach, gdzie filtracja pasmowa lub częstotliwość Rice'a pozwala oddzielać sygnały TWA interesującego nas podzespołu. Często do tych samych celów trzeba stosować daleko subtelniejsze miary niż częstotliwość Rice'a procesu i łączyć je ze sposobem funkcjonowania obiektu. Zagadnienie to postaramy się naświetlić w następnym punkcie, dotyczącym analizy widmowej (częstotliwościowej) procesów WA.