

## 10. Wykrywanie doraźnych uszkodzeń łożysk tocznych metodami wibroakustycznymi

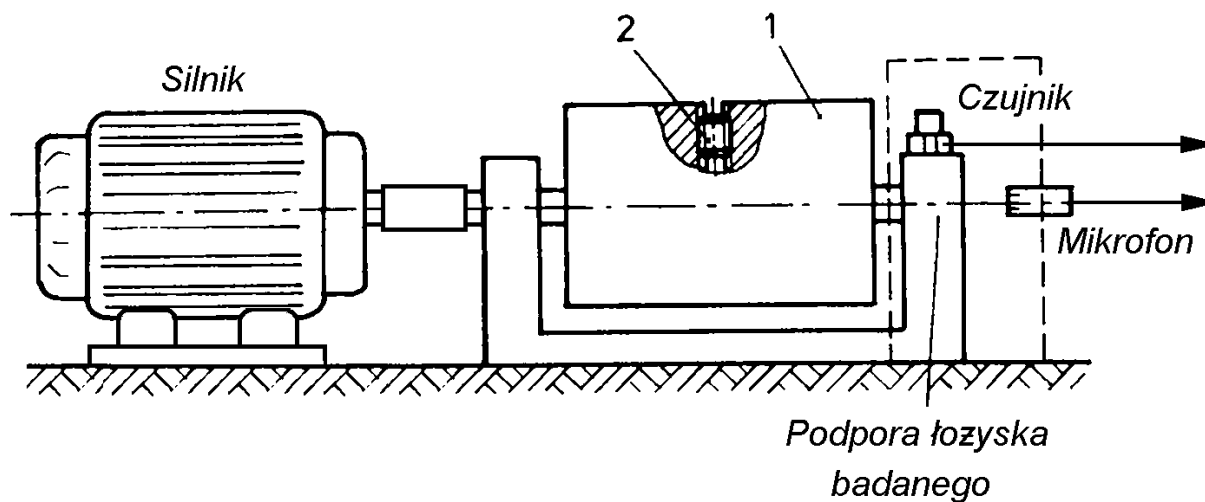
Ćwiczenie jest przykładem ilustrującym możliwości wykorzystania zaawansowanych technik pomiarowych w diagnostyce maszyn. Zadanie polega na ustaleniu, który element obracającego się łożyska tocznego (bieżnia zewnętrzna, bieżnia wewnętrzna, bądź element toczny) uległ uszkodzeniu.

Łożysko osadzone na wale stanowiska laboratoryjnego (rys. II.10.1) generuje sygnał wibroakustyczny przetwarzany akcelerometrem piezoelektrycznym i mikrofonem pojemnościowym. Część mechaniczno-napędowa składa się ze sterowanego falownikiem asynchronicznego silnika prądu zmiennego, sprzęgła podatnego oraz wału napędzanego z kołem zamachowym (1). Śruba (2) służy do przesuwania środka ciężkości koła zamachowego względem osi obrotu, co umożliwia zmianę poprzecznego obciążenia łożysk siłą odśrodkową spowodowaną zadaniem niewyrównoważeniem. W podporze od strony koła pasowego wał ułożyskowany na łożysku ślizgowym, w podporze przeciwległej - na badanym łożysku tocznym. Obciążenie osiowe realizuje się napięciem tulei ustalającej bieżnię zewnętrzną badanego łożyska.

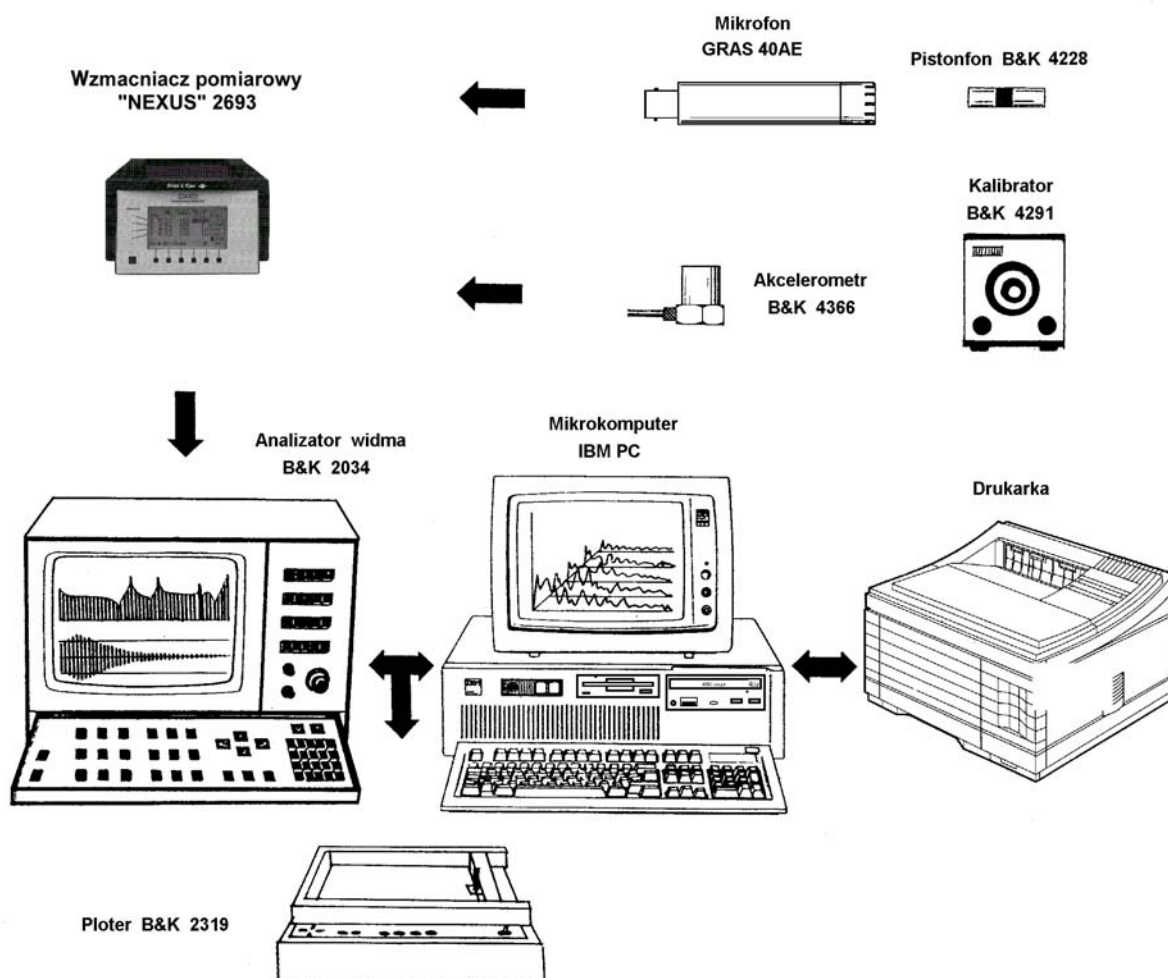
Podporę łożyska tocznego skonstruowano w sposób umożliwiający pomiar przyśpieszeń i ciśnienia akustycznego w sąsiedztwie badanego łożyska. Mierzone sygnały doprowadzono do wejść obu kanałów analizatora 2034.

Na bazie obu synchronicznie próbkowanych przebiegów czasowych metodą szybkiej transformaty Fourier'a obliczane są widma chwilowe, które po uśrednieniu stanowią podstawę diagnozy. Część pomiarową wykonuje się zestawem aparatury przedstawionym na schemacie (rys. II.10.2).

Uśrednione wzajemne widmo mocy hałasu i drgań, uzyskiwane analizatorem typu 2034, powstaje jako średnia zadanej liczby widm chwilowych. Analizator próbkuje równolegle oba przebiegi czasowe (z obu wejść analizatora) i tworzy z nich bloki. Każdy blok jest przekształcany zgodnie z algorytmem szybkiej transformaty Fourier'a (w postaci dyskretnej). W wyniku takiej operacji dla każdego bloku uzyskuje się widma chwilowe obu kanałów oddzielnie, oraz widmo wzajemne. Widma są uśredniane na bieżąco do momentu zrealizowania zadanej liczby uśrednień.



Rys. II.10.1 Schemat stanowiska laboratoryjnego



Rys. II.10.2 Schemat aparatury pomiarowo - rejestrującej

Wzorcowanie torów pomiarowych wykonywane jest przed rozpoczęciem ćwiczenia. Tok postępowania podczas ćwiczenia przedstawiono poniżej.

- ➔ Wymiana łożyska podpierającego czop końcowy wału na łożysko badane;
- ➔ Zmontowanie podpory łożyskowej, napięcie łożysk siłą wzdłużną, kontrola przewodów przetworników pomiarowych;
- ➔ Uruchomienie stanowiska, wykonanie analizy widmowej, określenie (i zanotowanie) prędkości wirowania wału podczas pomiarów;
- ➔ Zatrzymanie stanowiska i odwzorowanie graficzne (wykres ploterem lub wydruk) ekranu analizatora;
- ➔ Obliczenie częstotliwości charakterystycznych dla różnych uszkodzeń (komputer) przy założeniu wyłącznie poprzecznego obciążenia łożyska - kąt działania łożyska  $0^{\circ}$ ;
- ➔ Wskazanie potencjalnych związków charakterystycznych prążków widmowych z możliwymi uszkodzeniami;
- ➔ Postawienie hipotezy odnośnie uszkodzonego elementu;
- ➔ Odczytanie (z wykresu) częstotliwości składowej (prążka) najlepiej świadczącej o hipotetycznym uszkodzeniu;
- ➔ Obliczenie kąta działania łożyska na podstawie odczytanej wartości częstotliwości;
- ➔ Weryfikację przyjętej hipotezy o uszkodzeniu dla obliczonego kąta działania łożyska;
- ➔ Wskazanie na widmie (wraz z uzasadnieniem) efektów modulacyjnych wynikających z przyjętego modelu rozkładu obciążenia łożyska (rys. II.10.3).

Zaliczenie ćwiczenia na ocenę dostateczną uwarunkowane jest postawieniem poprawnej diagnozy i obliczeniem kąta działania łożyska, co wymaga dobrego zrozumienia zagadnień związanych z modelem generowania impulsów przez pojedyncze uszkodzenie elementu. Wyższe oceny uzyskają wyłącznie studenci, którzy wykażą się umiejętnością interpretacji wpływu modelu rozkładu obciążenia na postać widma hałasu i drgań zmierzonych podczas eksperymentu laboratoryjnego.

## **Metody diagnozowania stanu technicznego łożysk tocznych**

Ćwiczenie wykonywane jest metodami należącymi do grupy bazujących na wykrywaniu i analizie dyskretnych składowych sygnału wibroakustycznego (w tym podstawowych wymuszeń) oraz składowych, których pojawienie się związane jest z zapoczątkowaniem i rozwojem uszkodzeń poszczególnych elementów łożyska. Metody te wynikają zwykle z analizy kinematycznej obracających się elementów. Uproszczona tabela diagnostyczna maszyn wirnikowych (tabela II.10.1) przedstawia częstotliwości składowych, których amplitudy będą podwyższone przy konkretnych uszkodzeniach. Obserwacja dyskretnych składowych możliwa jest po wykonaniu analizy widmowej z dużą rozdzielczością. Do tego celu stosowane są przeważnie analizatory wąskopasmowe, zwykle o stałej szerokości pasma. Wyodrębnienie z widma tercjowego (oktawowego) dyskretnych składowych jest trudne lub wręcz niemożliwe.

Druga grupa metod wykorzystuje fakt, że procesy zużyciowe powodują zmiany w całym widmie. Dlatego diagnozowanie stanu łożyska i całego węzła odbywa się na podstawie parametrów diagnostycznych uwzględniających wypadkowe amplitudy sygnału wibroakustycznego w szerszym paśmie częstotliwości. Ten sposób diagnozowania ma na celu określenie poziomu wibroaktywności węzła i przygotowanie danych do podjęcia decyzji o wymianie lub dalszej eksploatacji łożyska bez rozróżnienia, który z jego elementów uległ uszkodzeniu. W praktyce przemysłowej metody tej grupy są obecnie dość rozpowszechnione ze względu na stosunkowo prosty sposób prowadzenia pomiarów i niewielkie wymagania aparaturowe. Prawdopodobieństwo trafnej diagnozy na podstawie szerokopasmowego pomiaru drgań jest jednak stosunkowo niskie (szacowane na około 50÷70%).

Trzecią grupę stanowią metody diagnozowania stanu na podstawie analizy drgań w obszarach częstotliwości rezonansowych. Są to przede wszystkim metody bazujące na analizie zmian właściwości obwiedni sygnału w zakresie częstotliwości rezonansowych elementu konstrukcyjnego (1 kHz÷20 kHz), lub w zakresie częstotliwości rezonansowych przetwornika pomiarowego (30 kHz÷500 kHz). Podstawą wnioskowania dla obu przypadków jest wpływ ciągu udarowych impulsów okresowo wymuszanych przejściem uszkodzonego elementu przez strefę kontaktu na częstotliwości rezonansowe układu mechanicznego. Ta grupa metod jest obecnie dość rozpowszechniona - wielu światowych producentów aparatury diagnostycznej może poszczycić się sukcesami w jej stosowaniu.

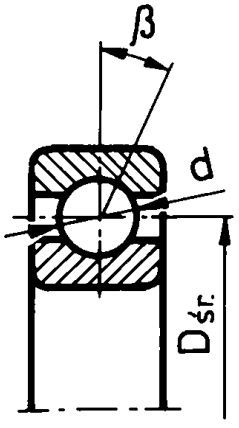
Rodzaj uszkodzenia	Częstość dominująca [Hz]	Kierunek drgań	Uwagi
Niewyrównoważenie wirnika	$f = \frac{n}{60}$	promieniowy	$n$ - liczba obrotów wirnika [obr./min.]
Luz w obudowie łożyska	podharmoniczne obrotów wału: $\frac{1}{2}f = \frac{n}{2 \cdot 60}$ $\frac{1}{3}f = \frac{n}{3 \cdot 60}$	promieniowy	
Wygięcie wału, błędy pasowania	$f$ ( $2f, 3f, 4f$ )	promieniowy i osiowy	
Uszkodzenia łożyska tocznego:  - bieżnia zewnętrzna  - bieżnia wewnętrzna  - kulka  - nieznaczone złuszczenia bieżni (pitting)	$f_z = \frac{z \cdot f}{2} \left( 1 - \frac{d}{D_{sr}} \cos \beta \right)$  $f_w = \frac{z \cdot f}{2} \left( 1 + \frac{d}{D_{sr}} \cos \beta \right)$  $f_k = \frac{D_{sr} \cdot f}{2d} \left( 1 - \left( \frac{d}{D_{sr}} \cos \beta \right)^2 \right)$  20...60 kHz	promieniowy i osiowy	 <p><math>f</math> - względna częstość wirowania pierścieni;  <math>z</math> - liczba elementów tocznych;  <math>\beta</math> - kąt działania łożyska.  Mogą wystąpić wyższe harmoniczne:  <math>f'_z = k \cdot f_z</math>  <math>f'_w = k \cdot f_w</math>  <math>f'_k = k \cdot f_k</math>  <math>k = 1, 2, 3, \dots</math></p>

Tabela II.10.1 Uproszczona karta diagnostyczna maszyn wirnikowych.

## Powstawanie sygnału wibroakustycznego wskutek pojedynczych uszkodzeń elementów łożysk tocznych

Uderzenia współpracujących powierzchni, spowodowane uszkodzeniem elementu łożyska tocznego, mogą przez swój impulsowy charakter pobudzić szereg drgań rezonansowych samego łożyska, zespołu bądź maszyny. Obrotowy ruch sprawia, że impulsy występują okresowo z częstotliwością zdeterminowaną przetaczaniem elementów współpracujących przez miejsce uszkodzone. Sygnał wibroakustyczny generowany wskutek uszkodzenia zależy przede wszystkim od:

- prędkości obrotowej łożyska;
- rozkładu obciążenia;
- funkcji przenoszenia między łożyskiem a przetwornikiem pomiarowym;
- eksponenta zaniku pobudzonych rezonansów.

Na podstawie znajomości geometrii łożyska i prędkości obrotowej wału można obliczyć częstotliwości związane z uszkodzeniami poszczególnych elementów (tabela II.10.1)

Dla przykładu przedstawiono szczegółową analizę generacji sygnału wibroakustycznego przez uszkodzoną bieżnię wewnętrzną. Uderzenia mają miejsce w chwili przetaczania się elementu tocznego po uszkodzeniu (pod warunkiem, że odbywa się to w strefie oddziaływania obciążenia na obracający się wał). Wskutek takiego mechanizmu powstaje nieskończony ciąg impulsów o równej amplitudzie i okresie pomiędzy impulsami  $T_d$ , który jest odwrotnością częstotliwości  $f_d$  przechodzenia elementu tocznego przez uszkodzenie na bieżni wewnętrznej.

Zakładając wielkość występującego impulsu siły w postaci delty Dirac'a  $\delta(t)$ , funkcję  $d(t)$  przedstawiającą przebieg czasowy działających wymuszeń, możemy opisać równaniem:

$$d(t) = d_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta[t - kT_d] \quad (\text{II.10.1})$$

$d_0$  reprezentuje amplitudę impulsu

Transformata Fouriera nieskończonej serii impulsów jest nieskończonym ciągiem impulsów, stąd  $D(f)$  otrzymamy w postaci zależności:

$$D(f) = d_0 f_d \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta[f - k f_d] \quad (2)$$

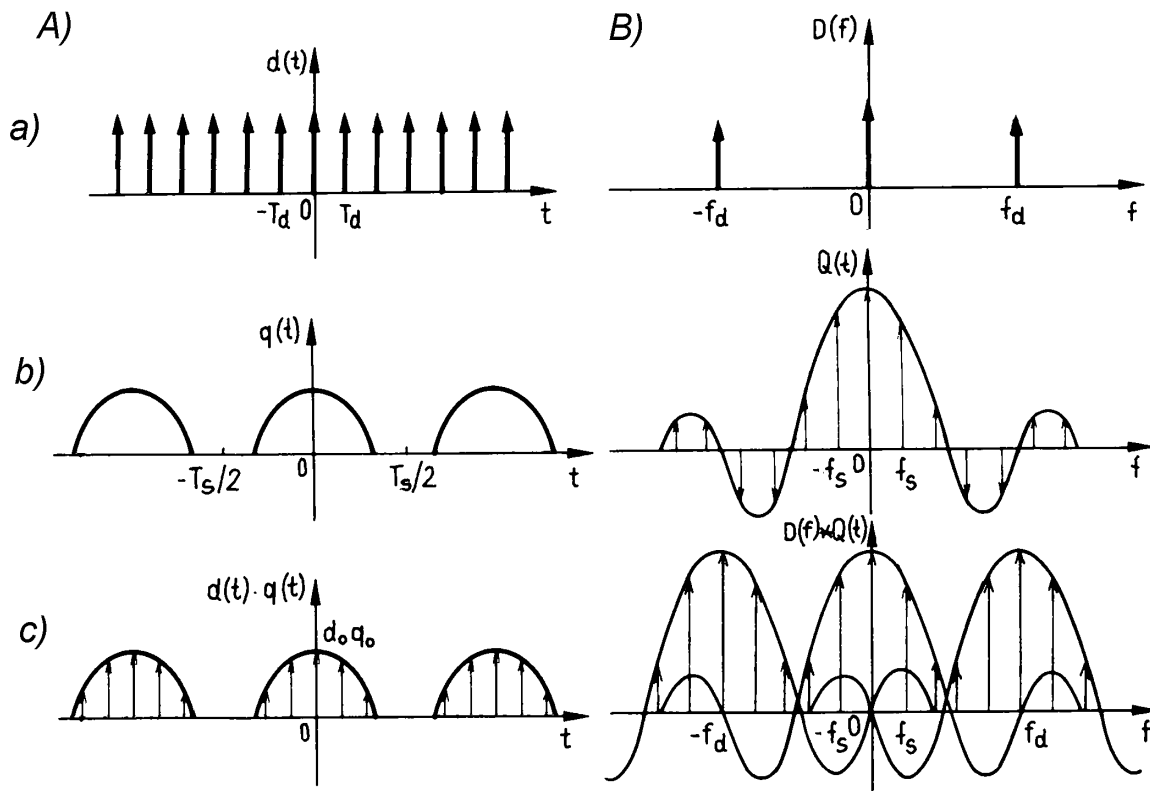
Z powyższego wynika, że na widmie sygnału generowanego przez uszkodzone punktowo łożysko wystąpią składowe o częstotliwościach będących krotnością fal.

Ponieważ funkcja  $d(t)$  jest zdefiniowana jako rzeczywista i parzysta, tym samym transformata Fouriera  $D(f)$  jest również rzeczywista i parzysta, a jej część urojona jest równa zero dla wszystkich częstotliwości; podobnie przesunięcie fazowe  $D(f)$  jest również zerem. Ciąg impulsów i jego transformata fourierowska przedstawiono na rysunku II.10.3 a.

Rozkład obciążenia promieniowego wokół obwodu łożyska przy występowaniu luzów (rys. II.10.4) można aproksymować równaniem Stribeck'a:

$$q(\theta) = q_0 \left[ 1 - \frac{1}{2 \cdot \epsilon} (1 - \cos \theta) \right]^n \quad (3)$$

gdzie:  $q_0$  - maksimum intensywności obciążenia,

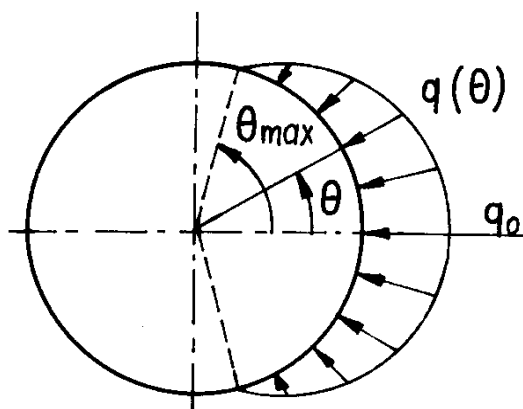


Rys II.10.3 A - przebieg czasowy; B - widmo

- a) impulsów wywołanych uszkodzeniem bieżni
- b) obciążenia łożyska
- c) impulsów wywołanych uszkodzeniem łożyska obciążonego

$\varepsilon$  - współczynnik rozkładu obciążenia,  
 $n$  - wykładnik zależny od elementu tocznego:

$$n = \frac{3}{2} \text{ dla kulki} \quad \text{oraz} \quad n = \frac{10}{9} \text{ dla wałeczka.}$$



Rys. II.10.4 Rozkład obciążenia w łożysku obciążonym promieniowo przy występowaniu luzów.

Człony  $q_0$ ,  $\varepsilon$  i  $\theta_{max}$  są funkcjami średnicowych luzów w łożysku i występującego obciążenia. Dla łożysk z dodatnim luzem ( $\varepsilon < 0,5$  i  $\theta_{max} < \pi/2$ ) otrzymujemy rozkład obciążenia w postaci przedstawionej na rysunku II.10.4. Zauważmy, że dla części obwodu bieżni łożyska obciążenie elementu tocznego jest równe zero. Przy takim rozkładzie obciążeń w ruchu ustalonym wału wirującego ze stałą częstotliwością  $f_s$ , wzór II.10.3 przyjmie postać:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 \left[ 1 - \frac{1}{2 \cdot \varepsilon} (1 - \cos \theta) \right]^n & \text{dla } |\theta| < \theta_{max} \\ 0 & \text{dla } |\theta| \geq \theta_{max} \end{cases} \quad (\text{II.10.4})$$

Zauważmy, że  $q(t)$  jest funkcją okresową opisującą przejście rozważanego punktu bieżni wewnętrznej przez strefę obciążenia dla pełnego kąta wału.

Funkcja  $q(t)$  jest przedstawiona na rysunku II.10.3 b w postaci nieskończonego ciągu krzywych obciążenia. Odległość pomiędzy środkami krzywych rozkładu obciążenia jest równa okresowi pełnego obrotu  $T_s$ , (częstotliwość obrotowa wału -  $f_s$ ). Jeśli początek ruchu w chwili ( $t=0$ ) odpowiada kątowi  $\theta=0$ , to środek krzywej rozkładu obciążenia wypada w chwili  $t=0$ .

Ponieważ  $q(t)$  jest funkcją okresową w dziedzinie czasu, transformata  $Q(f)$  zawiera ciąg impulsów w dziedzinie częstości odległych od siebie o wielkość  $f_s$  równą częstotliwości obrotowej wału, których obwiednia jest zdefiniowana transformatą fourierowską funkcji rozkładu obciążenia dla pojedynczego obrotu wału. Transformata Fouriera rzeczywistej i parzystej funkcji rozkładu obciążenia  $q(t)$  jest także rzeczywista i parzysta (jej część urojona jest równa zero dla wszystkich  $f$ ). Kąt fazowy transformaty  $Q(f)$  jest identyczny i równy zero dla wszystkich częstotliwości  $f$ .

Sygnal wibroakustyczny generowany przez badane podczas wykonywania ćwiczenia łożysko będzie zawierał elementy wywołane przez nałożenie obciążenia w przedstawionej postaci na wymuszenie od punktowego uszkodzenia bieżni. W tej sytuacji można przewidzieć, że przebieg czasowy sygnału odzwierciedli pomnożenie ciągu impulsów wywołanych uszkodzeniem przez rozkład obciążenia  $q(t)$ .

Budowa iloczynu  $d(t)q(t)$  przedstawiona jest na rysunku II.10.3 c. Zgodnie z regułą splotu, jeżeli dwa sygnały są mnożone w dziedzinie czasu, wówczas ich transformaty są splecione w dziedzinie częstości. Wynika stąd, że transformata  $Q(f)$  będzie powtarzana w dziedzinie częstości co  $f_d$  w obu kierunkach do nieskończoności. Funkcje  $d(t)$  i  $q(t)$  są rzeczywiste i parzyste, więc ich iloczyn  $d(t)q(t)$  jest też rzeczywisty i parzysty, podobnie jak splot ich transformat  $D(f) * Q(f)$ . W konsekwencji wypadkowa część urojona oraz kąt fazowy splotu są równe zero dla wszystkich częstości  $f$ . Pewien wpływ na poziom amplitud składowych zmodulowanych przez obciążenia ma wzajemne nakładanie się listków bocznych "zerowej" i kolejnych, przesuniętych o  $f_d$ , transformat obciążenia. W efekcie takiego zjawiska prążki widmowe o częstościach  $f_d$  mogą mieć amplitudy niższe od swoich modulacji.