



METODY IDENTYFIKACJI STANÓW NIEZDATNOŚCI EKSPLOATACYJNEJ ŁOŻYSK TOCZNYCH W OKRĘTOWYCH UKŁADACH NAPĘDOWYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY IMPULSÓW UDAROWYCH

Konrad Marszałkowski

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Zakład Siłowni Okrętowych
ul. G. Narutowicza 11/12, 80–233 Gdańsk, tel/fax: (58) 347 22 93
e-mail: konmarsz@pg.edu.pl

Abstrakt

Rozpatrując okrętowe zespoły napędowe z punktu widzenia transmisji energii mechanicznej największym zagrożeniem dla ich niezawodności jest utrata stabilności układu mechanicznego, co zazwyczaj objawia się zwiększeniem amplitudy drgań mechanicznych. Zwiększeniu tych drgań towarzyszy wzrost amplitudy okresowo zmiennych naprężeń wewnętrznych co jest prostą i nieuniknioną drogą do uszkodzenia znajdujących się w tym układzie łożysk. W artykule przybliżono istotę metody impulsu udarowego służącej do diagnostyki łożysk tocznych jako alternatywę do szeroko stosowanej diagnostyki drganiowej.

Słowa kluczowe: okrętowe wały napędowe, diagnostyka łożysk tocznych, metoda impulsów udarowych, metoda impulsów uderzeniowych, shock pulse method, SPM

1. Wprowadzenie

Doświadczenia eksploatacyjne różnego rodzaju okrętowych obrotowych zespołów napędowych pokazują, że bez względu na obszar ich zastosowania pierwotne przyczyny pogorszenia stanu dynamicznego układu mechanicznego, które skutkuje nadmiernym wzrostem amplitudy drgań mechanicznych, wynikają najczęściej z następujących czynników [3]:

- zużycia lub starzenia materiału konstrukcyjnego posadowienia na fundamencie elementów przenoszących moment obrotowy (starzenie gumowych amortyzatorów i podkładek z tworzyw chemoutwardzalnych, zwłaszcza przy oddziaływaniu wysokich temperatur, jak również produktów aktywnych chemicznie np. olejów smarowych czy paliw),
- zużycie lub starzenie materiału konstrukcyjnego sprzęgieł elastycznych i elastycznych więzi linii napędowej z instalacjami pomocniczymi,
- osiadanie konstrukcji nośnej fundamentu, w wyniku odkształceń statycznych lub oddziaływania obciążeń udarowych (np. podczas uderzenia w nabrzeże, wejścia na mieliznę),
- trwałe deformacje kadłuba, w którym zabudowany został zespół napędowy (w wyniku korozyjnego osłabienia jego struktury konstrukcyjnej),
- odkształcenia statycznego wałów napędowych, jako konsekwencji długotrwałego przestoju użytkowego,
- zanieczyszczenie, ubytki (odspojenia) materiału w wyniku zużycia trybologicznego,

korozyjnego lub erozyjnego elementów wirujących, które skutkuje nierównomiernym rozłożeniem mas w ruchu obrotowym układu,

- uszkodzenia łożysk w wyniku nieskutecznych uszczelnień, ponadnormatywnych obciążeń lub zbyt ciasnych pasowań.

Następstwem tych czynników są zazwyczaj następujące stany niezdatności eksploatacyjnej obrotowego zespołu napędowego:

- utrata współosiowości lub zgięcie linii wałów napędowych,
- przesunięcia środków ciężkości elementów wirujących linii napędowej względem jej osi obrotów (niezrównoważona statycznie lub dynamicznie siła odśrodkowa) [10].

W obu wypadkach zwiększają się siły nacisku w łożyskach, sprzęgłach i połączeniach zębatych układu, które prowadzą do rozwoju różnych postaci zużycia trybologicznego, a także wzrostu luzów montażowych. Ich obserwowalnym symptomem jest wzrost amplitudy drgań mechanicznych generowanych w charakterystycznych węzłach konstrukcyjnych zespołu napędowego.

Analiza uszkodzeń zmęczeniowych w obrotowych układach mechanicznych o złożonej rozbudowanej formie konstrukcyjnej wskazuje także, że blisko 50% ogólnej ich liczby było spowodowanych błędami w posadowieniu współpracujących maszyn, które skutkowało załamaniem bądź przesunięciem osi linii wałów [2]. Najbardziej newralgicznym elementem konstrukcyjnym są w takich wypadkach węzły łożyskowe, których uszkodzenie powoduje zazwyczaj unieruchomienie całego napędu.

Stosowane w układach napędowych łożyska toczne przenoszą drgania na obudowę, w związku z czym ich praca wywołuje wysoki poziom szumu, co z punktu widzenia konstrukcyjnego stanowi wadę maszyny. Szum ten może być jednak wykorzystany jako sygnał diagnostyczny, umożliwiający monitorowanie stanu technicznego łożysk bez konieczności ich demontażu i wyłączenia z ruchu układu napędowego.

2. Metody oceny stanu technicznego węzłów łożyskowych

Systemy diagnozujące przygotowane do nadzoru łożysk wykorzystują sygnały generowane w węzłach łożyskowych. Z punktu widzenia diagnostyki technicznej ważne jest jak najczęstsze kontrolowanie zmian stanu dynamicznego układu napędowego właśnie w węzłach łożyskowych, w celu określenia typu uszkodzenia oraz stopnia jego zaawansowania. Podejście takie pozwala zapobiec skutkom niespodziewanych awarii maszyn i wcześniej podjąć odpowiednie działania zapobiegawcze oraz naprawcze. Monitorowanie stanu dynamicznego węzłów łożyskowych umożliwia przeprowadzenie remontów, które wynikają z aktualnego stanu technicznego maszyny, co pozwala również na zaniechanie, niejednokrotnie przedczesnych, remontów zapobiegawczych, związanych z czasem pracy danego układu napędowego oraz remontów interwencyjnych, w przypadku nagłej i niespodziewanej awarii [9].

Popularną i relatywnie skuteczną metodą, która ma na celu diagnozowanie stanu technicznego łożysk tocznych jest wykonywanie okresowych (a najlepiej ciągłych) pomiarów drgań mechanicznych. Podczas pomiarów drganiowych dokonuje się zazwyczaj ogólnej analizy wartości szczytowej lub skutecznej przyspieszenia, prędkości lub przemieszczenia danego węzła łożyskowego w trzech prostopadłych do siebie kierunkach. Zasady pomiaru są znormalizowane (min. normy ISO 2372 oraz ISO 10816) co ułatwia i przyspiesza wnioskowanie diagnostyczne, ponieważ określono precyzyjnie tak zwane progi alarmowe dla mierzonych składowych drgań mechanicznych, dla skonkretyzowanych typów maszyn. Niestety metoda ta posiada także pewne wady do których możemy zaliczyć [1,2,4,5]:

- konieczność pomiaru drgań w trzech prostopadłych kierunkach, co wydłuża czas pomiaru sprzętem przenośnym (lub często nie jest możliwe ze względu na możliwość umieszczenia przetwornika drgań w danym kierunku, możliwie jak najbliżej łożyska) i podraża koszty instalacji systemów kontroli ciągłej,
- sygnał drganiowy nie zawiera informacji o jakości smarowania,

- wady lub uszkodzenia innej części maszyny np. niewyważony lub zgięty wał napędowy zakłócają („maskują”) sygnał drganiowy z łożyska,
- uszkodzenia węzła łożyskowego obserwowalne są dopiero przy dużym stopniu degradacji stanu technicznego łożyska.

Wyżej wymienione wady wymuszają rozszerzenie zestawu narzędzi diagnostycznych o dodatkowego techniki pomiarowe (miary diagnostyczne), do których można zaliczyć:

- pomiar współczynników szczytu jako stosunek wartości szczytowej sygnału drganiowego do jego wartości skutecznej (średniej kwadratowej) w danym przedziale częstotliwości drgań. Wartość współczynnika szczytu może być estymatą stanu łożyska tocznego. Najczęściej metoda ta opiera się na pomiarach przyspieszenia drgań. Przyjmuje się, że współczynnik szczytu większy od trzech świadczy o symptomie uszkodzenia łożyska,
- analizę widmowa drgań – przeprowadza się z użyciem szybkiej transformaty Fouriera - FFT (ang. *Fast Fourier Transform*), starając przyporządkować poszczególnym częstotliwościom drgań odpowiednie uszkodzenia maszyny oraz odseparować je od częstotliwości drgań odpowiadającym typowym uszkodzeniom łożysk. Metoda ta jest skuteczna tylko dla maszyn objętych długotrwałym nadzorem diagnostycznym, bowiem konieczna jest znajomość widma częstotliwości dla maszyny znajdującej się w stanie pełnej zdatności technicznej, a najlepiej nowej [6],
- pomiar kurtozy czyli statystyczna analiza sygnału drganiowego oparta o pomiar tak zwanego współczynnika kurtozy („impulsywności”) sygnału przyspieszenia drgań. Metoda umożliwia ocenę uszkodzenia łożyska bez znajomości historii pracy urządzenia. Do oceny stanu łożyska na ogół wystarczający jest pojedynczy pomiar. Do wad tej metody należy zaliczyć trudność odfiltrowania sygnałów impulsowych którego źródłem są inne części maszyny w pobliżu diagnozowanego węzła łożyskowego,
- analiza obwiedni sygnału drganiowego podlega na jego demodulacji, a następnie wyznaczeniu widma powstałej obwiedni sygnału. Tak wyznaczone widmo może zawierać składowe o częstotliwościach drgań odpowiadających defektom poszczególnych elementów łożyska. Warunkiem poprawnego wnioskowania diagnostycznego jest dokładna znajomość budowy węzła łożyskowego, jego geometrii oraz prędkości obrotowej,
- pomiar hałasu – najczęściej stosowany do określenia źródeł hałasu (szybka identyfikacja istotnie uszkodzonego łożyska) niż do diagnostyki eksploatacyjnej. Powodem tego jest fakt, iż badania najczęściej przeprowadzane są w warunkach przemysłowych, gdzie analiza widma hałasu emitowanego przez konkretny węzeł łożyskowy jest bardzo trudna.

Oprócz tego wykorzystuje się metody prostsze, bazujące na ogólnych oględzinach, analizie czynnika smarującego, osłuchu stetoskopem i pomiarze temperatury (np. z użyciem termowizji) obudowy łożyska lub fragmentu kadłuba maszyny, w której znajduje się diagnozowany węzeł łożyskowy.

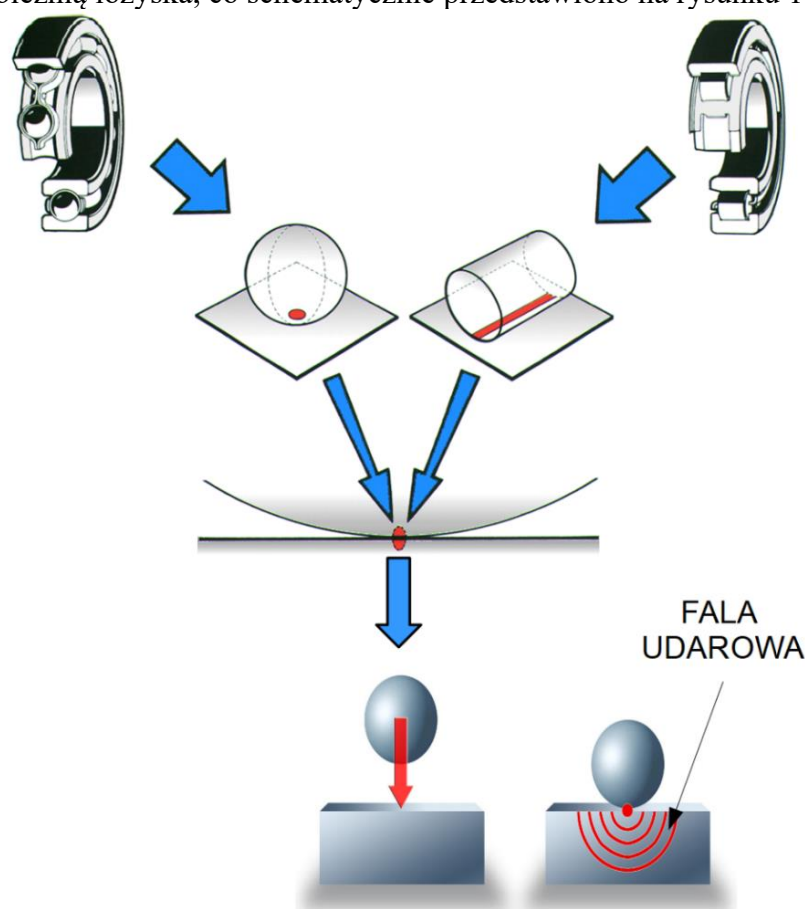
Bez względu na to, która z metod diagnostycznych zostanie wybrana do oceny stanu dynamicznego układu napędowego należy pamiętać, że bez znajomości parametrów geometrycznych łożysk, sprzęgieł, stanu regulacji silnika głównego zagadnienie to może być dość trudne do praktycznej realizacji i może wymagać od diagnosty dużego doświadczenia zawodowego.

3. Metoda impulsu udarowego

Metodę SPM (ang. *Shock Pulse Method*) opracowano na zlecenie A.P. Møllera - duńskiego armatora na początku lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku, jako metodę pewnej, łatwej w realizacji i wczesnej identyfikacji uszkodzeń łożysk tocznych stosowanych w pompach ładunkowych tankowców. Metoda ta została już 1969 roku opatentowana i wdrożona do produkcji przez szwedzkiego wynalazcę oraz założyciela firmy SPM – Eivinda Søhoela. Główne założenie polega na detekcji i pomiarze impulsów udarowych w obszarze częstotliwości rezonansowej przetwornika



drgań wynoszącej 32kHz, a następnie analizie energetycznej fali udarowej wywołanej zderzeniem elementu tocznego z bieżnią łożyska, co schematycznie przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Mechanizm powstawania fali udarowej w materiale konstrukcyjnym bieżni łożyska tocznego [8]

Impulsy udarowe są odpowiedzialne za utworzenie niskoenergetycznej fali sprężystej (fali mechanicznej), która tworzy się na styku elementów tocznych z bieżnią. Metoda impulsu udarowego polega na odczycie, gromadzeniu, a następnie przetwarzaniu informacji o fali sprężystej na sygnał impulsów elektrycznych poprzez wąskopasmowe przetworniki piezoelektryczne. Określona jest także prędkości uderzeń V_n (ze względu na związek prędkości z energią uderzenia) łożyska pracującego poprawnie jako [7]:

$$V_n = \beta \cdot n \cdot d \cdot \gamma \quad (1.1)$$

gdzie:

- n – prędkość obrotowa łożyska,
- d – średnica wewnętrzna łożyska,
- β, γ – stałe dobrane doświadczalnie.

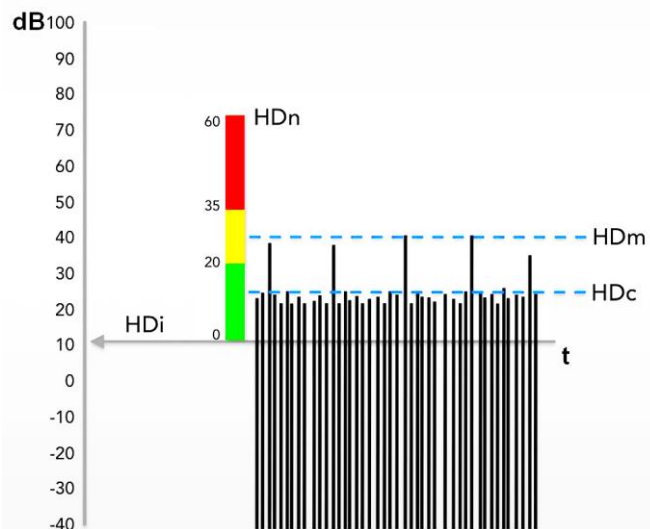
Ocena stanu łożyska polega na porównaniu aktualnie zmierzonego poziomu prędkości uderzeń z poziomem określonym dla łożyska pracującego poprawnie – wzorcowego. Wyrażony w decybelach stosunek tych poziomów zawiera informację o stanie łożyska [7]:

$$HD = 20 \cdot \log \left(\frac{V_n}{V_{ni}} \right) \text{ [dB]} \quad (1.2)$$

gdzie:

- V_n – prędkość uderzeń elementów tocznych łożyska badanego,
- V_{ni} – prędkość uderzeń elementów tocznych łożyska wzorcowego.

Wartość impulsu uderzeniowego, określona w skali decybelowej, reprezentowana jest dodatkowo poprzez wartość maksymalną HDm i wartość tzw. tła sygnału HDc. Interpretację graficzną poziomów sygnałów impulsu uderzeniowego przedstawiono na rysunku 2.

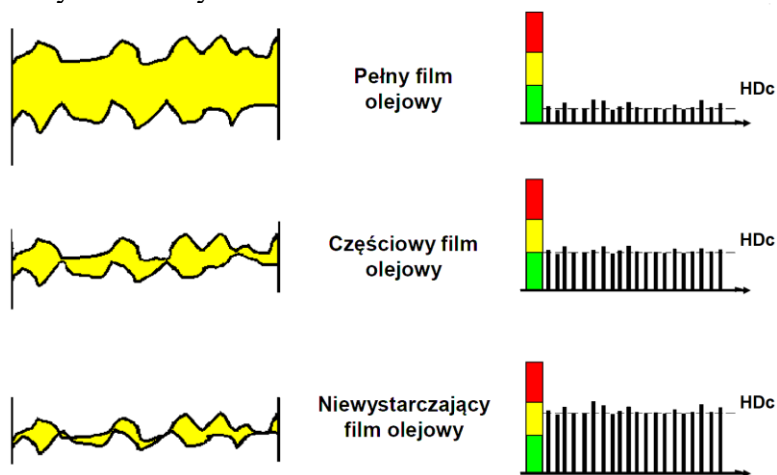


Rys.2. Interpretacja graficzna sygnału impulsu uderzeniowego w skali decybelowej [8]:

HDi – poziom sygnału łożyska wzorcowego, HDc – poziom sygnału tła łożyska badanego, HDm – poziom sygnału maksymalnego łożyska badanego, HDn – znormalizowana skala sygnału dla łożyska badanego

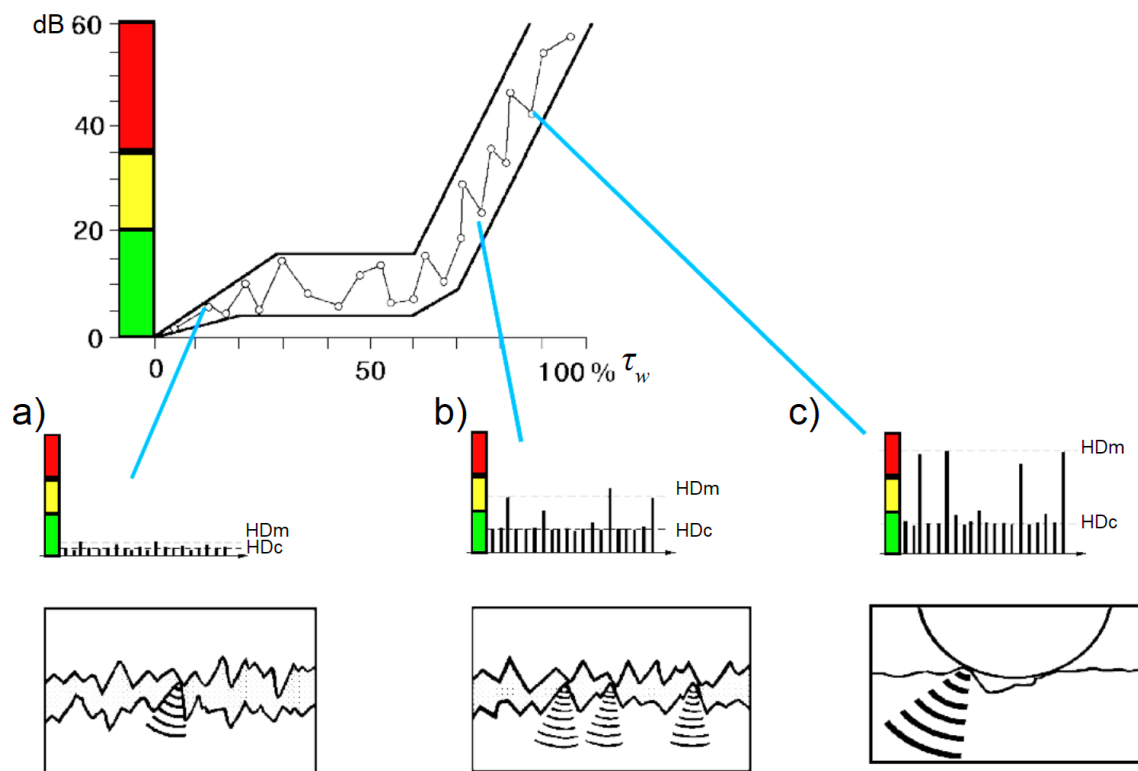
Uszkodzenie łożyska objawiające się względnie dużymi nieregularnościami stanu powierzchni bieżni lub elementu tocznego wywołują pojedyncze impulsy uderowe o wyższej wartości niż te, które przyjęto jako poziom tła sygnału. Najwyższa wartość impulsu uderowego zmierzona na łożysku, nazywana jest maksymalną wartością HDm i podawana jest w decybelach. Maksymalna wartość HDm wykorzystywana jest także do określenia warunków eksploatacji łożyska.

Chropowatość powierzchni bieżni łożyska (małe nieregularności) wyzwała szybką sekwencję impulsów uderzeniowych o niewielkiej energii, które razem tworzą tło sygnału łożyska. Film olejowy pomiędzy elementami tocznymi, a bieżniami łożyska, ma istotny wpływ na wielkość wartości tła. Przy normalnej grubości filmu poziom tła łożyska jest relatywnie niski. Ponadto niewłaściwe wyosiowanie i niewłaściwy montaż, a także niewystarczające smarowanie, zmniejszają grubość filmu olejowego w całym łożysku lub w jego części co powoduje to wzrost poziomu tła ponad normę. Zatem poziom tła HDc może być informacją pozwalającą ustalić przyczynę pogorszenia stanu technicznego węzła łożyskowego. Wpływ filmu olejowego w łożysku tocznym przedstawiono schematycznie na rys. 3.



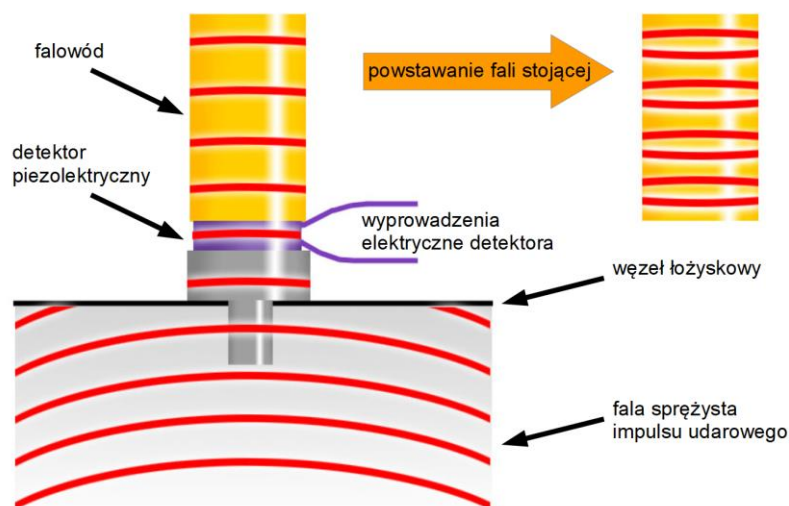
Rys.3. Wpływ filmu olejowego na poziom tła sygnału impulsu uderzeniowego [8]

Aby określić wartości graniczne dopuszczalnych wartości poziomu sygnału tła HDc i sygnału maksymalnego HDc należy ustalić wartość poziomu sygnału łożyska wzorcowego HDi. Odbywa się to poprzez wprowadzenie do aparatury pomiarowej rozmiaru łożyska (katalogowego) i wartości prędkości obrotowej bieżni wewnętrznej (zaleca się jednak, by zmierzyć ją przy okazji pomiaru sygnału udarowego SPM). Dla tak wprowadzonych danych aparatura pomiarowa wykorzystując bazę danych automatycznie dobiera wartość poziomu sygnału odniesienia HDi, od którego, w znormalizowanej skali decybelowej, w sposób barwny oznacza się wartości graniczne. Kolorem zielonym oznacza się węzeł łożyskowy w stanie pełnej zdatności technicznej, kolorem żółtym oznacza się zakres poziomów sygnałów udarowych wskazujących degradację stanu technicznego, a kolorem czerwonym uszkodzenie węzła łożyskowego. Na rysunku 4 przedstawiono relację poziomów sygnałów HDm i HDc jako funkcję trwałości łożyska tocznego.



Rys. 4. Trwałość węzła łożyskowego oraz odpowiadające jej poziomy sygnałów udarowych [8]: a) węzeł łożyskowy znajdujący się w stanie pełnej zdatności technicznej, b) stan częściowej zdatności technicznej c) uszkodzenie węzła łożyskowego

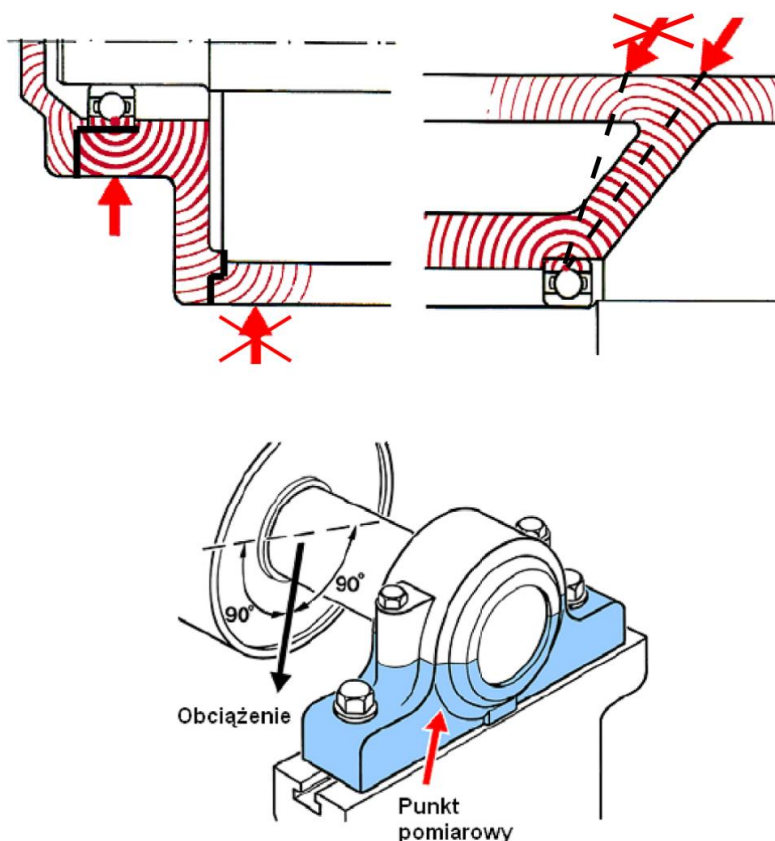
W metodzie SPM przetwornikiem pomiarowym jest detektor piezoelektryczny, którego częstotliwość rezonansowa wynosząca 32kHz została dobrana eksperymentalnie poprzez analizę czasową amplitud oraz widm sygnałów wywołanych zderzeniem elementów tocznych z materiałem konstrukcyjnym bieżni łożysk. Wyzwalane podczas takiego udaru fale mechaniczne charakteryzują się relatywnie bardzo krótkim czasem narastania i opadania amplitudy. Otrzymanie wąskiego pasma przenoszenia przetwornika pomiarowego oraz wysokiej czułości wymagało zastosowania w głowicy pomiarowej dodatkowego falowodu z mosiądzu. Wymiary falowodu oraz jego masa zostały tak dobrane, aby docierająca do czoła przetwornika niskoenergetyczna fala sprężysta (z prędkością 5000m/s), po przejściu przez detektor piezoelektryczny, przebyła dalszą drogę przez falowód odbijając się od jego końca tworząc falę stojącą. Układ taki tworzy mechaniczny wzmacniacz sygnału oraz filtr pasmowo-przepustowy odcinający częstotliwości różniące się o 10% od częstotliwości rezonansowej przetwornika. Ograniczenie pasma sygnału udarowego ułatwia i przyspiesza dalszą obróbkę matematyczną przez aparaturę pomiarową. Na rysunku 5 przedstawiono zasadę działania przetwornika impulsu udarowego.



Rys.5. Zasada pomiaru impulsów uderowych z użyciem przetwornika piezoelektrycznego [8]

Pomimo dużej czułości przetwornika impulsu uderowego i odporności na sygnały nie pochodzące z węzła łożyskowego należy pamiętać, że główną informacją w metodzie SPM nie jest wartość drgań mechanicznych, lecz impuls uderowy niesiony falą sprężystą drogą materiałową. Dlatego też pomiary impulsu uderowego muszą być realizowane zgodnie z kilkoma zasadami:

- droga sygnału pomiędzy łożyskiem a punktem pomiarowym powinna być możliwie „najkrótsza” i przyjmować postać linii prostej,
- na drodze sygnału może znajdować się tylko jedno mechaniczne połączenie np. pomiędzy łożyskiem a obudową łożyska,
- punkt pomiarowy powinien znajdować się w strefie obciążenia łożyska (rys.6.)



Rys.6. Zasady umiejscowienia punktów pomiarowych [8]

4. Podsumowanie

Niezaprzeczalną zaletą metody impulsu uderzeniowego jest to, że bazuje ona na zgromadzonych doświadczalnie i opracowanych statystycznie sygnałach pochodzących ze zdecydowanej większości stosowanych w przemyśle typów łożysk tocznych, z uwzględnieniem ich rozmiarów, prędkości obrotowych wału, sposobu smarowania a nawet producentów. Rozległa baza danych zgromadzona przez producenta aparatury pomiarowej przyspiesza wnioskowanie diagnostyczne i ułatwia stosowanie tej metody przez personel techniczny niższego szczebla, co w ogólnym rozrachunku przynosi niepodważalne korzyści ekonomiczne. Dodatkowo do zalet tej metody zaliczyć także można:

- możliwość oceny stanu technicznego więcej niż jednego łożyska w węźle łożyskowym,
- metoda SPM sprawdza się dla bardzo niskich prędkości obrotowych $n > 5 \text{ min}^{-1}$,
- możliwość oceny stanu technicznego łożysk maszyn pracujących przy różnych prędkościach obrotowych.

Wadą jest wysoki koszt zakupu zestawu diagnostycznego SPM oraz to, że nie da się dokonać nawet zgrubej weryfikacji stanu technicznego łożyska bez informacji o jego rozmiarze.

Literatura

1. Blata J., Juraszek J. (2013). Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka. Ostrava. VŠB – Technická Univerzita Ostrava.
2. Dwojak J., Rzepiela M. (2005). Diagnostyka drganiowa stanu maszyn i urządzeń. Warszawa. Biuro Gamma.
3. Korczewski Z. (2017). A method to assess transverse vibration energy of ship propeller shaft for diagnostic purposes. Gdańsk. Polish Maritime Research 4 (96) 2017 vol. 24; str. 102-107.
4. Marszałkowski K. (2019). Metody identyfikacji stanów niezdatności eksploatacyjnej okrętowych wałów napędowych – pomiary drgań mechanicznych linii wałów. Journal of Polish Cimeeac, 14, 135-145.
5. Plutecki Z., Szymaniec S., Smykała J. (2014). Nowa metoda ustawiania napędów przemysłowych. Katowice. Zeszyty problemowe – maszyny elektryczne. Nr 2/2014 (102). Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.
6. Rudnicki, J., Korczewski, Z. (2013). Diagnostic testing of marine propulsion systems with internal combustion engines by means of vibration measurement and results analysis. Combustion Engines vol. 154(3).
7. Sohøel E. (1994). The SPM Method. A complete set of tools for evaluating the running condition of operating rolling element bearings. SPM Instrument AB Strängnäs.
8. Sundström T. (2010). An Introduction to the SPM HD Method. SPM Instrument AB Strängnäs.
9. Szymaniec S. (2009). Pomiary drgań względnych w silnikach elektrycznych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 82/2009. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.
10. Szymaniec S. (2013). Wykorzystanie fazy w diagnostyce układów napędowych. Katowice. Zeszyty problemowe – maszyny elektryczne. Nr 2/2013. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.