

METODY IDENTYFIKACJI STANÓW NIEZDATNOŚCI EKSPLOATACYJNEJ OKRĘTOWYCH WAŁÓW NAPĘDOWYCH – POMIARY DRGAŃ MECHANICZNYCH LINII WAŁÓW

Konrad Marszałkowski

*Politechnika Gdańska,
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa,
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych
ul. G. Narutowicza 11/12, 80–233 Gdańsk, tel: + 48 58 347 22 93,
e-mail: konmarsz@pg.edu.pl*

Streszczenie

Analizując eksploatacyjne przyczyny utraty współosiowości linii okrętowych wałów napędowych należy zauważyć, że jedynie systematyczna kontrola wzajemnego posadowienia elementów linii napędowej (silnika, linii wałów pośrednich i wału śrubowego) prowadzi do zwiększenia niezawodności okrętowego układu napędowego. Wstępnej oceny stanu współosiowości linii wałów okrętowych, w zakresie ich przesunięcia i załamania dokonuje się podczas postoju statku w stoczni. Natomiast ostatecznej oceny poprawnego ustawienia wszystkich współpracujących ze sobą elementów obrotowego układu mechanicznego będącego napędem statku dokonuje się wyłącznie podczas prób ruchowych, prowadząc pomiary drgań mechanicznych na reprezentatywnych zakresach ustalonego obciążenia. W artykule dokonano przeglądu podstawowych technik i narzędzi wykorzystywanych w trakcie prowadzenia tego procesu.

Słowa kluczowe: okrętowe wały napędowe, wały śrubowe, osiowanie linii wałów, drgania mechaniczne.

1. Wprowadzenie

Szacuje się, że ponad 50% ogólnej liczby uszkodzeń maszyn wirujących, do których zaliczają się okrętowe zespoły napędowe można przypisać błędom w ich wzajemnym posadowieniu [4]. Dlatego też niezwykle istotnym zagadnieniem z punktu widzenia eksploatacji okrętowych zespołów napędowych jest odpowiedni dobór techniki systematycznego monitoringu osiowania linii wałów. Następstwem braku wymaganej współosiowości jest najczęściej przesunięcie środków ciężkości elementów wirujących linii napędowej względem jej osi obrotów (niezrównoważona statycznie lub dynamicznie siła odśrodkowa). W tym przypadku w łożyskach, sprzęgłach i połączeniach zębatych układu napędowego zwiększają się siły nacisku, które prowadzą do rozwoju w nich różnych postaci zużycia tribologicznego, a także wzrostu luzów montażowych. Obserwowalnym symptomem diagnostycznym jest wówczas wzrost amplitudy drgań giętnych generowanych w charakterystycznych węzłach konstrukcyjnych układu mechanicznego. W przypadku znacznej nieosiowości lub zgięcia wału mogą się również pojawić drgania w kierunku osiowym.

2. Pomiary drgań i ich analiza

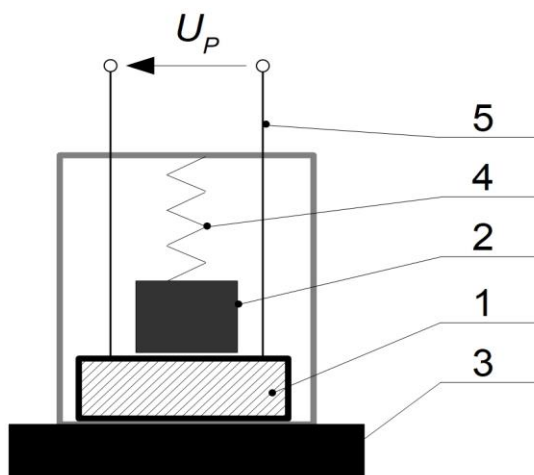
Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych wałów napędowych opierająca się na pomiarach drgań mechanicznych polega na mierzeniu określonych wielkości fizycznych, charakteryzujących drgania wybranych elementów linii napędowej [7]. Do takich wielkości zalicza się przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie drgań. Dla każdej z tych wielkości można mierzyć jej wartości chwilowe, średnie lub szczytowe. Najpełniejszą informację na temat procesów

dynamicznych zachodzących w układzie napędowym statku daje zapis wartości chwilowych. Pomiary wartości średnich (najczęściej jest to średnia kwadratowa prędkości drgań) przeprowadza się wtedy, gdy chodzi o ogólne informacje o ilości rozpraszanej energii użytecznej wskutek generowanych drgań, celem natychmiastowej oceny zdatności technicznej np. węzła łożyskowego. W niektórych układach są wprowadzone ograniczenia odnośnie maksymalnych chwilowych wartości drgań. Dla ich wyznaczenia wystarczy mierzyć szczytowe wartości drgań [2, 9, 10, 11, 14].

Zasadniczym elementem układu pomiarowego jest przetwornik drgań, który umożliwia określenie przebiegu drgań w czasie, w postaci sygnału analogowego. Obecnie są stosowane do pomiaru drgań różnego typu przetworniki wielkości mechanicznych na wielkości elektryczne. Generalnie można wyodrębnić przetworniki drgań do pomiarów drgań bezwzględnych oraz drgań względnych [2, 4].

Do grupy przetworników służących do pomiaru drgań bezwzględnych należą przetworniki elektrodynamiczne i piezoelektryczne z masą sejsmiczną. Natomiast pomiar drgań względnych wykonuje się najczęściej przetwornikami bezstykowymi takimi jak: przetworniki zbliżeniowe indukcyjne, wiroprowadowe, pojemnościowe oraz metodami optycznymi wykorzystującymi wiązkę lasera [5]. Wadą elektrycznych przetworników zbliżeniowych jest ograniczenie obszaru ich stosowania tylko do pomiaru drgań elementów ferromagnetycznych.

Najbardziej rozpowszechnionym przetwornikiem do pomiaru drgań jest piezoelektryczny przetwornik przyspieszenia drgań, którego schemat ideowy (budowy wewnętrznej) przedstawiono na rys. 1. Podstawową częścią piezoelektrycznego przetwornika jest płytka materiału piezoelektrycznego. Element piezoelektryczny poddany działaniu sił mechanicznych (rozciąganie–ściskanie) generuje ładunek elektryczny, proporcjonalny do działających sił.



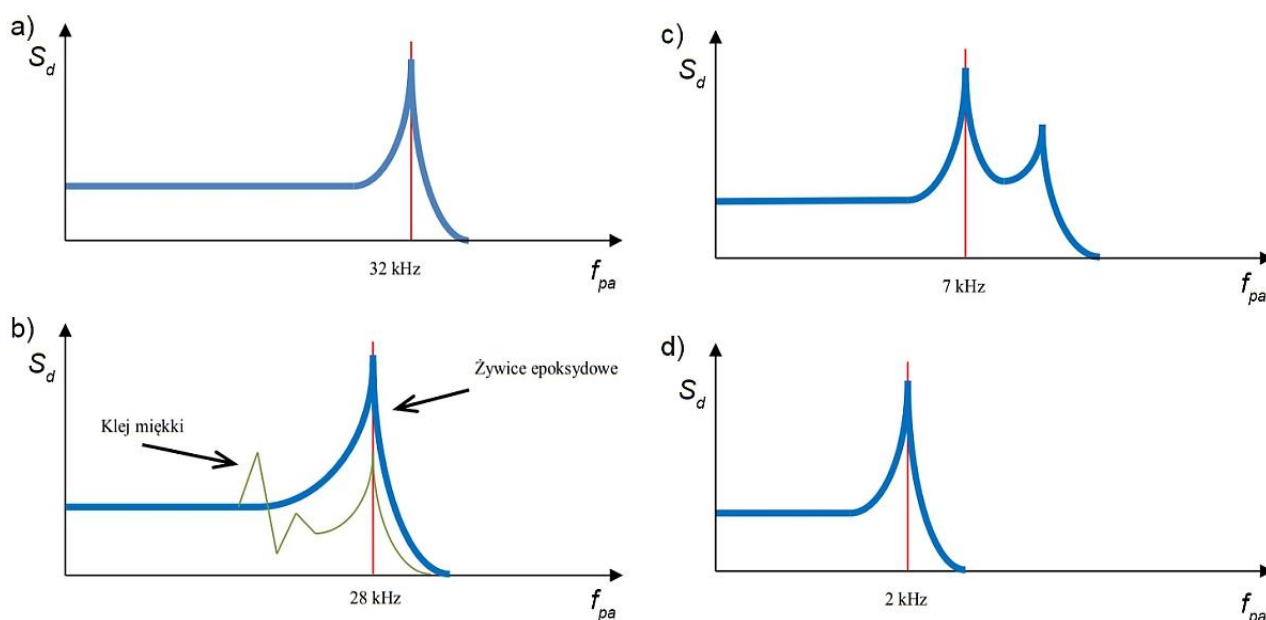
Rys. 1. Budowa piezoelektrycznego przetwornika przyspieszenia drgań:
1 – płytka piezoelektryczna, 2 – masa sejsmiczna, 3 – podstawa montażowa, 4 – sprężyna ustalająca, 5 – wyprowadzenia sygnału elektrycznego

Element piezoelektryczny znajdujący się w przetworniku umieszczony jest w ten sposób, że podczas drgań poddawany jest działaniu siły reakcji masy sejsmicznej. Siła ta jest proporcjonalna do przyspieszenia. Dla częstotliwości znacznie niższych niż częstotliwość rezonansowa całego układu (masa sejsmiczna plus sprężyna) przetwornika, przyspieszenie masy równa się przyspieszeniu podstawy. Oznacza to, że wartość sygnału wyjściowego jest proporcjonalna do przyspieszenia, któremu poddawany jest przetwornik.

Sygnał wyjściowy jest proporcjonalny do chwilowych przyspieszeń drgań i zazwyczaj mieści się w granicach od 1 do 10 mV/m/s² (czułość przetwornika). Masa przetwornika drgań jest istotna przy pomiarze drgań lekkich konstrukcji, gdzie przyłożenie dodatkowej masy (w postaci

masy przetwornika) może znacząco zmienić zarówno częstotliwość, jak i poziom drgań, co ma wpływ na wnioskowanie diagnostyczne. Stąd też do badań powinno się używać czujników, których masa nie przekracza 1/10 masy badanego elementu [1, 9].

Bardzo ważnym czynnikiem, mającym wpływ na jakość przetwarzania sygnału drganiowego za pomocą przetwornika przyspieszenia drgań jest jego zamocowanie. Przetwornik drgań powinien być zamocowany w taki sposób, by jego główna oś czułości pokrywała się z kierunkiem pomiaru. Czułość poprzeczna jest niewielka i wynosi zwykle 1 – 2 % poniżej czułości mierzonej wzdłuż osi [14]. Optymalny sposób montażu przetwornika przyspieszenia drgań polega na jego przykręceniu (o ile jest to możliwe) do powierzchni elementu za pomocą śruby montażowej. Luźne mocowanie prowadzi do obniżenia częstotliwości rezonansowej, co z kolei równoznaczne jest ze zmniejszeniem użytecznego zakresu częstotliwości przetwornika drgań. Na rys. 2. przedstawiono zależności sygnału drganiowego od częstotliwości przetwornika drgań przy różnych sposobach montowania przykładowego przetwornika piezoelektrycznego typu ICP352C68 firmy PCB Piezotronic. Można w ten sposób przeanalizować ich wpływ na zmianę częstotliwości rezonansowej.



Rys. 2. Obraz deformacji sygnału drganiowego $S_d = f(f_{pa})$ w zależności od sposobu montażu przetwornika drgań: a) montaż z wykorzystaniem połączenia śrubowego, b) połączenie z użyciem kleju, c) montaż z użyciem połączenia magnetycznego, d) pomiar z użyciem sondy ręcznej [14]

Spośród przedstawionych przykładów mocowanie przetwornika drgań za pomocą połączenia śrubowego jest rozwiązaniem najlepszym, ale nie zawsze możliwym do zastosowania w praktyce, bowiem taki montaż wymaga wykonania np. gwintowanego otworu. W tym rozwiązaniu, śruba przytrzymuje przetwornik drgań do gładkiej i płaskiej powierzchni badanego obiektu. Maksymalną sztywność montażu otrzymuje się smarując powierzchnię pomiarową cienką warstwą smaru litowego. Częstotliwość rezonansowa przy tego rodzaju montażu wynosi około 32 kHz i nie odbiega od częstotliwości rezonansowej otrzymanej na stanowisku kalibracyjnym.

Inną metodą jest przyklejenie przetwornika drgań za pomocą wosku pszczelego. Częstotliwość rezonansowa ulega wówczas nieznacznie zmianie (obniżeniu). Ze względu na stopniowe topnienie wosku, maksymalna temperatura pracy przetwornika wynosi 40°C, co nie sprawdza się w warunkach siłowni okrętowej.

Przetwornik drgań można przyłożyć do badanego węzła drgań poprzez ręczną sondę (tzw. penetrator) lub umieścić na badanym obiekcie za pomocą kleju czy też uchwytu magnetycznego.

Jednakże taki montaż często bywa niemożliwy do realizacji, na przykład ze względu na zastosowanie amagnetycznych materiałów do budowy układu napędowego (często spotykane w przypadku okrętów wojennych). W takiej sytuacji stosuje się stalowe podkładki przyklejane na czas pomiaru w punktach pomiarów drgań – rys. 3.



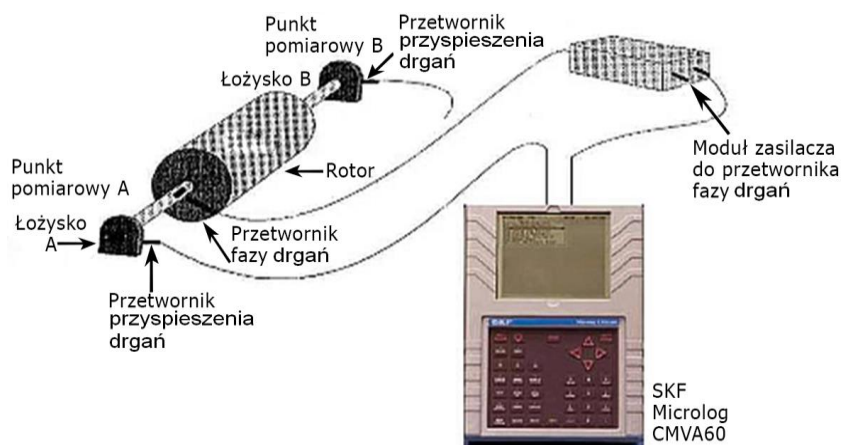
Rys. 3. Sposób przygotowania punktów pomiaru drgań w płaszczyznach pionowej i poziomej na amagnetycznej (aluminiowej) obudowie przekładni redukcyjnej silnika Zvezda M520 - poprzez przyklejenie stalowych podkładek

Sygnal elektryczny, uzyskany z przetwornika drgań, jest sygnałem małej mocy, rzędu mikro – lub miliwatów wymagającym od aparatury rejestrującej dużej impedancji wejściowej, aby zapewnić właściwe działanie toru pomiarowego. Napięcie sygnału osiąga wartość od kilku do kilkudziesięciu mV. Przyrządem, który zapewnia właściwe działanie przetwornika drgań i umożliwi zwiększenie napięcia sygnału wyjściowego z tegoż przetwornika jest wzmacniacz ładunku (lub napięcia) sygnału elektrycznego – tzw. kondycjoner sygnału. W najnowszych rozwiązaniach tego typu stosowane są wzmacniacze zintegrowane z przetwornikiem drgań (i są zasilane tym samym przewodem sygnałowym), które umożliwiają znaczne zwiększenie stosunku poziomu sygnału pomiarowego do poziomu zakłóceń.

Szerokopasmowe pomiary drgań obrotowego układu mechanicznego dokonywane okresowo lub prowadzone w sposób ciągły niosą jedynie informacje o ogólnym stanie technicznym np. węzła łożyskowego, a nie o stanie dynamicznym poszczególnych jego elementów. Dlatego też, chcąc zbadać pierwotną przyczynę utraty stabilności badanego fragmentu linii napędowej i stan zaawansowania procesu zużycia (starzenia) jej poszczególnych podzespołów należy przeprowadzić analizę częstotliwościową zarejestrowanego sygnału drganiowego. Analiza częstotliwościowa zwana także analizą widmową, polega na „rozłożeniu” sygnału drganiowego na składowe harmoniczne o określonych (charakterystycznych) częstotliwościach. Amplitudy częstotliwości składowych oraz ich zmiany rejestrowane w procesie eksploatacji dostarczają szczegółowej informacji na temat lokalnych rezonansów, pozwalając zidentyfikować i zlokalizować uszkodzenie konkretnego podzespołu np. łożyska (a nawet określić która część łożyska uległa uszkodzeniu) lub wykryć nadmierną niewspółosiowość linii wałów napędowych [11]. W związku z powyższym śledzenie zmian wartości poszczególnych składowych harmonicznych sygnału drganiowego na drodze pomiarów okresowych lub ciągłych może stanowić podstawę skutecznego nadzoru diagnostycznego linii napędowej statku.

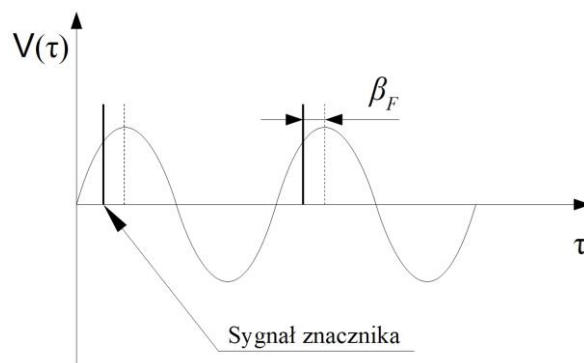
Istotnym uzupełnieniem analizy widmowej zarejestrowanego sygnału drganiowego może być wykonanie charakterystyki amplitudowo-fazowej drgań, która jest pomocna w przypadku

diagnozowania luzów w układzie napędowym statku, wskazania niewyważenia czy nawet wygięcia wału. Metoda fazowa polega na jednoczesnym gromadzeniu sygnałów: drganiowego i kąтового (kąta obrotu) z obracającego się układu mechanicznego [12]. Przykładową konfigurację rejestratora drgań z jednoczesnym pomiarem fazy przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat ideowy układu pomiarowego z wykorzystaniem pomiaru fazy drgań [12]

Pomiar kąta fazowego drgań odbywa się podczas ruchu obrotowego wału na drodze wyznaczenia kąta β_F pomiędzy sygnałem znacznika, a amplitudą prędkości drgań – rys. 5. Przy czym uwzględniana jest tylko amplituda częstotliwości podstawowej (oraz jej druga harmoniczna) odpowiadająca częstości wirowania wału. Dzięki tej metodzie możliwe jest wykrycie wygięcia wału (co może być skutkiem długotrwałego postoju statku) – mierząc drgania w kierunku osiowym wału i porównując kąty fazowe pomiędzy pierwszą, a następnie drugą harmoniczną w widmie prędkości drgań. Gdy kąt β_F wynosi 180° dla pierwszej harmonicznej to wygięcie wału występuje pośrodku jego długości, dla drugiej harmonicznej – w pobliżu sprzęgła [12].

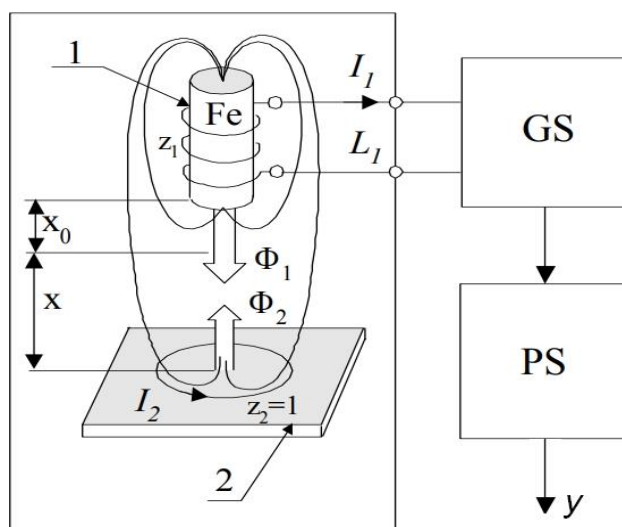


Rys. 5. Sposób wyznaczania kąta fazowego β_F na wykresie amplitudowo – fazowym prędkości drgań $V(\tau) = f(\tau)$

Podobne rozwiązanie wykorzystano w diagnostyce drganiowej turbinowych silników typu DM76 i DR77 stanowiących napęd szybkich okrętów wojennych. W celu określenia niewyważenia zespołów wirnikowych tych silników dokonywano pomiarów prędkości drgań w punktach kontrolnych wraz z opracowaniem charakterystyki widmowej. Parametrami kontrolnymi wskazującymi utratę stabilności mechanicznej układu łożyskowania wirnika były stosunki wartości prędkości drgań mechanicznych odpowiadające drugiej i trzeciej harmonicznej częstotliwości podstawowej (od częstości wirowania wału wirnika) do jej pierwszej harmonicznej [6].

Innym, ważnym aspektem w przypadku diagnostyki drganiowej linii wałów napędowych statków są ich małe prędkości obrotowe, a co za tym idzie drgania mechaniczne mają także charakter niskoczęstotliwościowy. Z tego względu pomiary drgań mechanicznych o relatywnie niskich częstotliwościach charakterystycznych z użyciem standardowych przetworników drgań (będących na wyposażeniu większości przenośnych analizatorów drgań) jest dość problematyczny. Utrudnienie to wynika z konieczności stosowania przetworników drgań o dużej masie sejsmicznej, a te z kolei cechują się nierównomierną charakterystyką pasma przenoszenia rejestrowanego sygnału drganiowego. W tym przypadku kontaktowy pomiar drgań wymaga szczególnie starannego i odpowiednio sztywnego punktu montażowego, chcąc uzyskać odpowiedniej dokładności widmo częstotliwości drgań w czasie diagnozowania linii napędowej statku.

Rozwiązaniem niwelującym wady kontaktowej metody pomiaru drgań i umożliwiającym pomiar drgań samego wału mogą być metody bezkontaktowe. W tej grupie rozwiązań można wyróżnić dwie najszerszej stosowane metody: elektryczną i optyczną. Metody elektryczne wykorzystujące przetworniki przemieszczeń liniowych pracujące w prostych układach pomiarowych pozwalają mierzyć przemieszczenia drgań w zakresie do około 25 mm z dokładnością do 1 μm [1]. Najpowszechniej stosowane przetworniki indukcyjne stosowane są do pomiaru małych przemieszczeń zarówno statycznych jak i dynamicznych. Głównymi zaletami tego rozwiązania są: niewielkie wymiary, prosta konstrukcja, brak elementów ruchomych i wynikająca stąd mała inercja pomiaru. Duża trwałość przetworników wiroprowadowych oraz odporność na zakłócenia elektryczne predestynuje je do zastosowania w przemyśle, szczególnie w pomiarach drgań mechanicznych realizowanych w zakresie niskich częstotliwości. Na rys. 6. przedstawiono zasadę działania oraz uproszczony układ pomiarowy przetwornika wiroprowadowego.

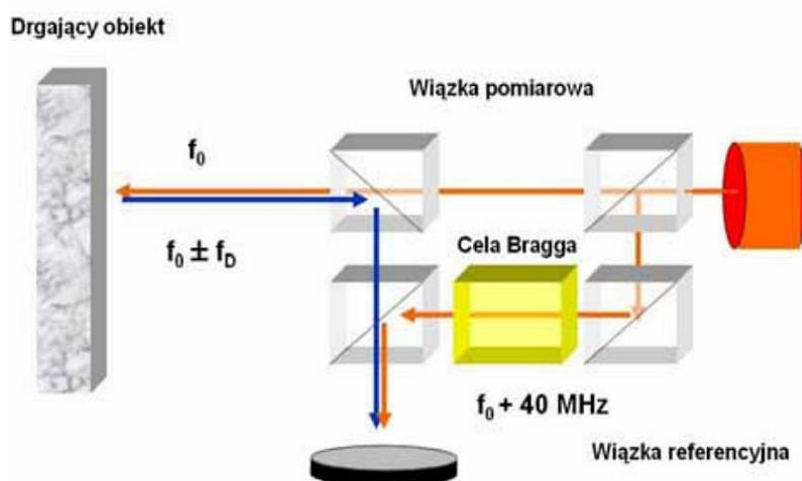


Rys. 6. Zasada działania indukcyjnego (wiroprowadowego) przetwornika przemieszczeń:
 1 – cewka elektryczna, 2 – powierzchnia pomiarowa, GS – generator sygnału sinusoidalnego, PS – przetwornik sygnału, y – sygnał napięciowy przemieszczenia drgań

Zasadniczymi elementami przetwornika są: cewka elektryczna 1, zasilający ją generator sygnału sinusoidalnego GS oraz przetwornik sygnału PS. Zasada działania przetwornika opiera się na pomiarze natężenia prądu płynącego w uzwojeniu cewki elektrycznej, której indukcyjność zmienia się w zależności od odległości od powierzchni pomiarowej 2. Zmiany wartości tych wielkości, zależnie od układu generatora, mogą wywoływać zmianę jego częstotliwości (okresu), napięcia wyjściowego lub poboru prądu ze źródła zasilania. Wymienione wielkości fizyczne stanowią sygnał pomiarowy, który po odpowiednim przekształceniu w układzie przetwarzania sygnału zamieniany jest na analogowy sygnał elektryczny (prądowy lub napięciowy). Z zasady działania przetwornika wiroprowadowego wynika, że indukcyjność cewki przetwornika zmienia się liniowo

względem przemieszczenia drgań jedynie dla jego małych wartości. W praktyce przetworniki wiroprowadowe wykorzystywane są w pomiarach przemieszczeń do kilku mm, rzadko – do kilkunastu mm, przy czym są one nieliniowe, zwłaszcza w szerszych zakresach pomiarowych. Wymaga to zwykle stosowania układów linearyzujących, aczkolwiek dla przemieszeń charakteryzujących typowe drgania mechaniczne maszyn nie ma takiej konieczności.

Metody optyczne do rejestracji sygnału drganiowego wykorzystują odbicie wiązki promieniowania laserowego. Zasada działania laserowego analizatora drgań opiera się na porównaniu wiązki lasera odbitej od powierzchni badanego obiektu i docierającej do fotodetektora ze znanym sygnałem referencyjnym [8, 5, 13]. Jednakże przy pomiarach drgań obiektów ruchomych, sam pomiar czasu „wędrówki” wiązki lasera do powierzchni i z powrotem do toru optycznego rejestratora jest niewystarczający do określania przemieszczania drgań mechanicznych mierzonego elementu. Rozwiązaniem tego ograniczenia jest pomiar widma odbitej wiązki laserowej czyniąc tę metodę bardzo dokładną. Porównanie to jest możliwe dzięki zastosowaniu efektu Dopplera. Schemat ideowy laserowego analizatora drgań przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Zasada działania laserowego analizatora drgań [13]

Długość fali odbitego promieniowania zmniejsza się (barwa światła przesuwa się w kierunku fioletu), przy wzajemnym zbliżaniu się obiektu i analizatora lub zwiększa się (barwa światła przesuwa się w kierunku czerwieni), gdy obiekt oddala się od analizatora drgań. Sygnał wyjściowy z przetwornika laserowego jest proporcjonalny do prędkości drgań badanego obiektu. Analizator laserowy zapewnia bezkontaktowy pomiar drgań i co najważniejsze, może być prowadzony z dużej odległości, co w przypadku zabudowanych linii wałów jest nieocenioną zaletą. Pomiar jest punktowy, dzięki czemu eliminuje się zakłócenia wynikające z nieregularnych kształtów sąsiadujących elementów np. śrub łączących kołnierze sprzęgieł wałów. Laserowe analizatory drgań wyróżniają się szerokim pasmem częstotliwościowym, pozwalającym na analizę drgań od częstotliwości bliskich zeru, co może pozwolić na rejestrację drgań maszyn wolnoobrotowych dużej mocy, na przykład wałów napędowych w trakcie rozruchu napędu statku [5].

Montując na badanym odcinku wału znacznik kątowy możliwe jest wyznaczenie (jednoczesne, wraz z pomiarem drgań) kąta przesunięcia fazowego czyniąc tę metodą najbardziej uniwersalną i szybką. Do podstawowych wad tej metody pomiarowej należy wysoka cena zakupu urządzenia oraz bezwzględny wymóg starannego przygotowania powierzchni wału. Ponieważ zasada działania analizatora laserowego opiera się na wykorzystaniu wiązki lasera i efekcie Dopplera w zakresie prędkości światła, należy zapewnić powierzchni pomiarowej wału odpowiednio niską chropowatość oraz usunąć wszelkie wklęsłości i wypukłości. Ponadto powierzchnia wału powinna odbijać promień laserowy, a nie rozpraszać go. Kolejnym utrudnieniem ograniczającym zastosowanie tej metody w warunkach okrętowych jest konieczność

sztynnego montażu głowicy pomiarowej tak, by nie wykonywała ruchu względem obracającego się wału, co może być warunkiem trudnym do spełnienia biorąc pod uwagę drgania przenoszone drogą strukturalną od pracujących maszyn i urządzeń siłowni okrętowej.

3. Podsumowanie

Diagnostykę układów napędowych opierającą się wyłącznie na zjawiskach wibroakustycznych charakteryzuje pewne ograniczenie, ponieważ niesie jedynie informację wtórną na temat stanu technicznego wału napędowego, gdyż ze względu na technologię pomiaru najczęstszym miejscem rejestracji sygnału drganiowego jest węzeł łożyskowy. Każde łożysko, niezależnie od rodzaju i sposobu pracy jest źródłem drgań, których poziom nie musi zależeć od wyosiowania wirującego wewnątrz łożyska wału. Pomocna w tym przypadku analiza widmowa zarejestrowanego sygnału może nieść istotną informację diagnostyczną jedynie w przypadku, gdy dysponuje się widmem sygnału drganiowego zebranego podczas wcześniejszych pomiarów w celu dokonania analizy porównawczej (co nie zawsze jest możliwe). Ponadto ocena stanu dynamicznego układu napędowego bez znajomości parametrów geometrycznych łożysk, sprzęgieł, stanu regulacji silnika głównego jest złożona i dość trudna do praktycznej realizacji.

Typowych wad charakteryzujących klasyczne metody drganiowej diagnostyki obrotowych układów mechanicznych nie mają bezstykowe układy pomiarowe. Pośród wszystkich zaprezentowanych w artykule rozwiązań najlepszą metodą, zdaniem autora, jest ta, która do pomiaru drgań wykorzystuje promień lasera, tym bardziej, że jej przydatność diagnostyczna została praktycznie potwierdzona [5]. Nie mniej jednak, konieczność starannego przygotowania powierzchni wału do prowadzenia tego typu pomiarów może stanowić pewną trudność, która w połączeniu z wysoką ceną układu pomiarowego nie sprzyja szerszemu rozpowszechnieniu tej metody pomiarowej na statkach. Dlatego też, najefektywniejszym (ekonomicznie i badawczo) sposobem pomiaru drgań okrętowych wałów napędowych jest zastosowanie do tego celu indukcyjnych przetworników przemieszczenia, najczęściej montowanych w pobliżu miejsc wykazujących najwyższą amplitudę drgań. Przemawia za tym relatywnie niska cena zakupu takiego przetwornika, duża odporność na warunki panujące w siłowni okrętowej oraz brak wpływu stanu powierzchni wału na rejestrowany sygnał drganiowy.

4. Literatura

1. Blata J., Juraszek J. (2013). Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka. Ostrava. VŠB – Technická Univerzita Ostrava.
2. Cholewa W. Moczulski W. (1993). Diagnostyka techniczna maszyn. Pomiary i analiza sygnałów. Gliwice. Skrypty uczelniane nr 1758. Politechnika Śląska.
3. Dąbrowski Z., Komorska I., Puchalski A. (2001). Diagnostowanie błędów wykonania i montażu układów wirujących. Warszawa - Radom WiZPITE.
4. Dwojak J., Rzepiela M. (2005). Diagnostyka drganiowa stanu maszyn i urządzeń. Warszawa. Biuro Gamma.
5. Dwojak J., Rzepiela M., Struzik I. (2011). Wykorzystanie wibrometru laserowego do diagnostyki eksploatacyjnej silników elektrycznych na podstawie własnych doświadczeń. Katowice. Zeszyty problemowe – maszyny elektryczne. Nr 89/2011. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.
6. Grządziela A. (1998). Metoda kontroli współosiowości elementów okrętowego układu napędowego z turbinowymi silnikami spalinowymi. Praca doktorska. Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte. Wydział Mechaniczno-Elektryczny.
7. Huang Q., Zhang C., Jin Y., Yuan C., Yan X. (2015). Vibration analysis of marine propulsion shafting by the coupled finite element method. Journal of Vibroengineering, Vol. 17, Issue 7, 2015, str. 3392-3403.

8. Łazarz B., Wojnar G., Czech P. (2007). *Wibrometria laserowa i modelowanie: narzędzia współczesnej diagnostyki przekładni zębatych*. Katowice – Radom. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB.
9. Piotrowski J. (2006). *Shaft alignment handbook*. New York. Marcel Dekker Jn.
10. Randall R. B. (2011). *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive*. John Wiley & Sons, Ltd Publication.
11. 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).
12. Szymaniec S. (2013). Wykorzystanie fazy w diagnostyce układów napędowych. Katowice. *Zeszyty problemowe – maszyny elektryczne*. Nr 2/2013. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.
13. Waszczuk–Młyńska A., Radkowski S., (2013). Drgania płyty, model analityczny i jego weryfikacja za pomocą wibrometru laserowego. *Politechnika warszawska. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 4(95)/2013.
14. Żółtowski B., Łukasiewicz M. (2012). *Diagnostyka drganiowa maszyn*. Bydgoszcz. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB.