

IDENTIFICATION OF THE SHIP'S HULL IMPACT LOAD ON THE BASE OF THE POWER TRANSMISSION SYSTEM'S VIBRATIONS MEASUREMENTS

Zbigniew Dąbrowski¹⁾, Andrzej Grządziela²⁾

¹⁾*Institute of Machine Design Fundamentals
Narbutta 84, 02-524 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 2348276, fax: +48 22 2348622
e-mail: zdabrow@simr.pw.edu.pl*

²⁾*Naval Academy
Mechanical Electrical Faculty
Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia, Poland
tel.: +48 58 6262724
e-mail: a.grzadziela@amw.gdynia.pl*

Abstract

The following paper presents the results of an experiment in which an influence of underwater explosions on the ship's power transmission system dynamics was measured. The results, obtained for two different configurations of the object's position and the explosion's place, were compared.

The experiment was conducted while the power transmission system was working, so that it was possible to define the relation between a hull's impact load and the vibrations of propeller shaft's bearings.

As a result of this research, the methodology of measurements and signal analysis has been elaborated and, in consequence, the obtained data can be used to improve an vibroacoustic diagnostic system working on-line.

Localisation of the explosives, the configuration of measurements points, measuring time before and after explosion, the comparing of the signal analysis using RMS and Peak value of the acceleration, the comparing of the signal analysis results in two frequency bands, the comparing of the signal analysis results, the comparing of the two explosion effects, the comparing of the two explosion effects are presented in the papers.

Keywords: *dynamic systems modelling, underwater explosion, power transmission system*

IDENTYFIKACJA OBCIĄŻENIA UDAROWEGO KADŁUBA OKRĘTU NA PODSTAWIE POMIARU DRGAŃ UKŁADU NAPĘDOWEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentu w którym badano wpływ wybuchów podwodnych na dynamikę układu napędowego okrętu. Porównano wyniki dla dwóch różnych usytuowań obiektu w stosunku do miejsca eksplozji. Eksperyment wykonano podczas pracy układu napędowego, co pozwoliło określić wpływ impulsowego obciążenia kadłuba na drgania łożysk wału śrubowego.

Efektom badań jest opracowanie metodyki pomiaru i analizy sygnału wibroakustycznego pozwalającej na wykorzystanie uzyskanych danych do doskonalenia drganiowego systemu diagnostycznego pracującego w systemie (trybie) on-line.

Schemat rozmieszczenia ładunków w trakcie badań, rozmieszczenie punktów pomiarowych, zakres czasu pomiaru przyspieszeń przed i po detonacji, porównanie wyników analiz pulsacji pęcherzy przy wykorzystaniu wartości szczytowej i wartości skutecznej przyspieszeń porównanie analiz przy różnych zakresach częstotliwości, porównanie analiz porównanie oddziaływań dla detonacji, porównanie oddziaływań dla detonacji, są przedstawione w artykule.

Słowa kluczowe: *modelowanie systemów dynamicznych, eksplozja podwodna, układ napędowy*

1. Wstęp

Diagnozowanie technikami wibroakustycznymi elementów układu napędowego jest w chwili obecnej normalną praktyką inżynierską. Symptomy drganiowe są czytelne, łatwo przetwarzalne i niewątpliwie zawierają informacje o stanie systemu i jego elementów. Oczywiście wydobycie tej informacji bywa często trudne i wymaga zastosowania dość wyrafinowanych metod analizy sygnałów. Jest to jeden z powodów, dla których wymienione zagadnienie jest w dalszym ciągu obiektem prac naukowych a istniejące systemy monitorujące podlegają ustawicznym modyfikacjom i udoskonaleniom. Mechaniczny układ napędowy okrętu jest przypadkiem dość szczególnym. Układ napędowy składa się tutaj z silnika (lub silników) napędowego i mniej lub bardziej złożonego układu przeniesienia mocy, którego elementem jest zawsze stosunkowo długi wał śrubowy przekazujący moment napędowy na pędnik (śrubę napędową). Wał łożyskowany jest w kadłubie okrętu układem łożysk, który musi zawierać łożysko oporowe (wzdłużne), przenoszące na kadłub siłę napędową. Nie jest przedmiotem tego artykułu analiza różnych rozwiązań konstrukcyjnych układów jedno i wielosilnikowych (których jest wiele). Wszystkie one jednak posadowione są na stosunkowo elastycznym podłożu, które stanowi odkształcalny sprężyste kadłub.

Kadłub okrętu bowiem w trakcie użytkowania podlega obciążeniom w postaci sił i momentów wywołujących drgania giętne, skrętne i wzdłużne, które są przedmiotem analiz projektowych i eksploatacyjnych. Poza typowymi oddziaływaniami dynamicznymi pochodzącymi od falowania, sił hydrodynamicznych lub wynikającymi z cyrkulacji, kadłuby okrętów wojennych narażone są na eksplozje podwodne i nawodne. Oddziaływania impulsowe powstałe w odległości większej od promienia pierwszego pęcherza gazowego eksplozji podwodnej [1,8] nie są w stanie wywołać pęknięcia poszycia. Istotnym zagrożeniem jest odkształcenie plastyczne, którego konsekwencje przekładają się na łożyska nośne i oporowe oraz na zmiany wzajemnego położenia w układzie transmisji momentu napędowego. Oddziaływania dynamiczne wałów okrętowych zasadniczo nie zagrażają samym wałom, lecz ich łożyskom. Jak wykazano w pracy [2] modelowanie sił i momentów występujących w stanach "pozaprojektowych" daje możliwość prognozowania stanów awaryjnych oraz postawienia trafnej diagnozy eksploatacyjnej.

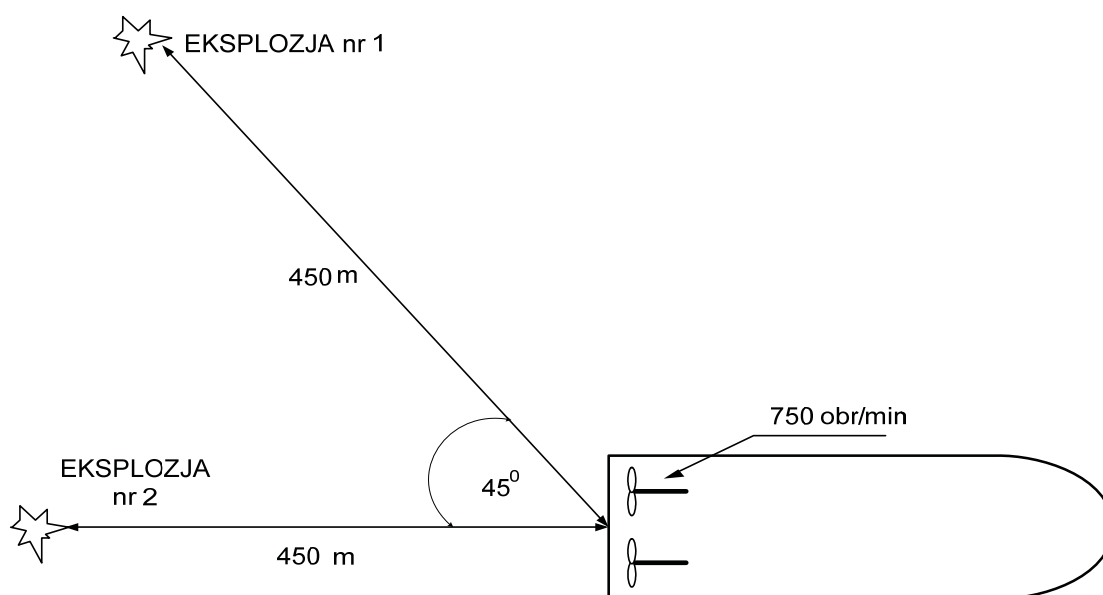
System nadzoru drganiowego pracy elementów siłowni okrętowych powinien zatem być w stanie rozróżnić oddziaływania dynamiczne wywołane awariami elementów układu napędowego (sprzęgieł, łożysk, przekładni pędnika i silnika napędowego) od oddziaływań wywołanych sprężystą odpowiedzią kadłuba na zakłócenia zewnętrzne, co jest zagadnieniem trudnym ze względu na stosunkowo złożony charakter widma oraz nakładanie się na siebie składowych o zbliżonych częstotliwościach. Nie należy zapominać, że układ jest nieliniowy, a odpowiedzi dynamiczne towarzyszące "normalnym" uszkodzeniom eksploatacyjnym niskoenergetyczne, a co za tym idzie trudno obserwowalne i bardzo łatwo maskowane przez zakłócenia zewnętrzne [3].

Jak na razie nie istnieje gotowy "uniwersalny" model dynamiczny siłowni okrętowej, a doskonale przygotowane badania symulacyjne nie są w stanie dostarczyć pełnej informacji o zachodzących zjawiskach w obiektach rzeczywistych. Dotyczy to przede wszystkim problemów modelowania zakłóceń oraz opisu sztywności i tłumienia. Trudnością są najczęściej nieliniowe charakterystyki, występujące w obiektach rzeczywistych. Badania eksperymentalne nie tylko weryfikują przyjęte modele, ale czasami mogą wnieść nowe, dotychczas nie analizowane symptomy zmian parametrów dynamicznych. Analiza porównawcza wyników eksperymentu badawczego, szczególnie czynnego, do wyników symulacji dostarcza cennych informacji pozwalających modelować sztywność i tłumienie. Innym atutem takiego postępowania jest możliwość weryfikacji przyjętych modeli układów, arbitralnie zakładanych liniowych strat itp.

Badania prowadzone w warunkach rzeczywistych (na morzu) są z reguły bardzo kosztowne i tym samym trudne do realizacji, lecz absolutnie niezbędne dla właściwej identyfikacji modelu matematycznego stanowiącego podstawę systemu diagnostycznego.

2. Badania oddziaływania wybuchu podwodnego

Przeprowadzone badania na poligonie morskim MW RP miały na celu ocenę odkształcalności kadłuba pod wpływem eksplozji podwodnej oraz analizę charakteru oddziaływania impulsowego na konstrukcję kadłuba i elementy układu napędowego (głównie łożyska). W trakcie badań wykonano dwie eksplozje ładunków o masie $m=40$ kg TNT na głębokości 30 m. Pierwszy ładunek został zdetonowany w odległości 400 m od rufy okrętu przy kącie do płaszczyzny symetrii okrętu 45° na lewą burtę – rys. 1, przy pracujących układach napędowych obu burt przy nominale $N=0$ i obrotach silnika $n_{\text{silnika}}=750$ obr/min oraz prędkości okrętu $V_o = 0$ w. Drugi ładunek zdetonowano w odległości 400 m od rufy okrętu wzdłuż jego płaszczyzny symetrii przy tym samym obciążeniu układu napędowego. Wybór odległości i masy ładunku był zdeterminowany warunkami bezpieczeństwa oraz wewnętrznymi przepisami MW RP.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia ładunków w trakcie badań
 Fig. 1. Localisation of the explosives

Celem badań była analiza porównawcza parametrów drganiowych występujących przed i po detonacji ładunków a także dobór konfiguracji pomiarowej i metod analitycznych pozwalających na identyfikację parametrów wybuchu.

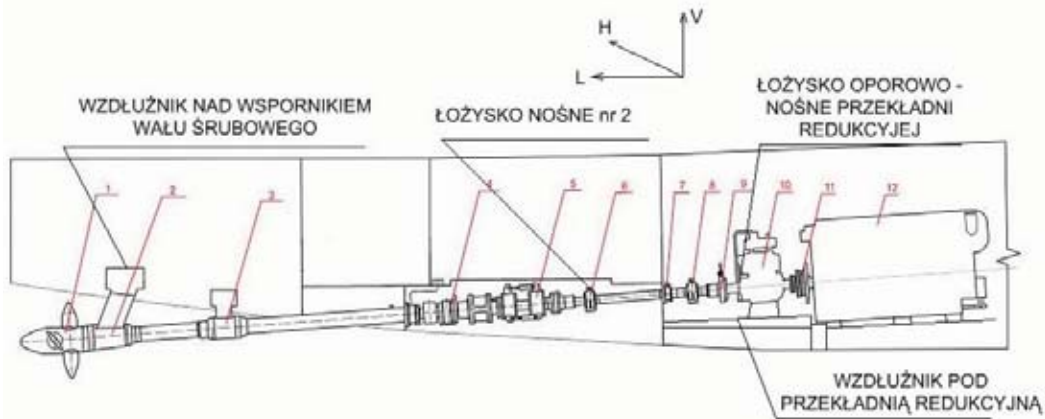
3. Dobór konfiguracji pomiarowej

Duża dynamika sygnałów oraz potrzeba wielokanałowej rejestracji w trybie *on-line* narzuca wąskie grono potencjalnych analizatorów. W badaniach wykorzystano 2 zdublowane 5-kanałowe oraz jeden 8-kanałowy analizator firmy Brüel & Kjaer co pozwoliło na wyposażenie 14 kanałów w akcelerometrię oraz dwóch kanałów w optyczne sondy tachometryczne. Przy doborze konfiguracji pomiarowej kierowano się potrzebą uzyskania:

- analizy FFT z rozdzielczością pozwalającą na obserwowanie efektów słabo nieliniowych,
- analizy rzędów,
- analizy dynamiki prędkości obrotowych wałów w stanach nieustalonych,
- analizy zmian wartości przebiegu czasowego sygnału impulsowego.

W trakcie badań sygnały drganiowe rejestrowano na łożyskach linii wałów oraz wzdłużnikach – rysunek 2.

Wybór miejsc pomiarowych oraz kierunki pomiaru zostały wytypowane drogą przestrzennej selekcji sygnałów oraz wcześniejszymi badaniami pilotażowymi.



Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych
 Fig. 2. The configuration of measurements points

4. Analiza wyników pomiarowych

Przeprowadzone badania miały za zadanie określić odpowiedź układu napędowego oraz kadłuba na zewnętrzne oddziaływania dynamiczne. Warunki hydrometeorologiczne pozwoliły na eliminację zakłóceń wynikających z falowania oraz oddziaływania wiatru. Laserowe badania współosiowości wykluczyły odchyłki współosiowości w linii wałów jako źródła sygnałów wibroakustycznych. Podstawowymi źródłami wymuszeń były reakcje od niewyrównoważenia resztkowego pędnika, współpracy ząbów w przekładni oraz niewyrównoważenia silnika. W trakcie detonacji ładunku wybuchowego wymuszenie impulsowe oddziaływało bezpośrednio na kadłub, a pośrednio na fundamenty łożysk linii wałów.

Oddziaływanie eksplozji podwodnej nie ma charakteru pojedynczego impulsu, lecz szeregu od 2 do 4 istotnych energetycznie pulsacji pęcherzy gazowych [1]. Proces pulsacji powtarza się wielokrotnie, aż do momentu, gdy pęcherz gazowy wypłynie na powierzchnię morza. Eksplozje podwodne i nawodne z punktu widzenia reakcji fali uderzeniowej na linię wałów należy rozpatrywać w dwóch przypadkach:

- fala (lub jej składowa) uderzeniowa pada na śrubę poosiowo,
- fala (lub jej składowa) uderzeniowa pada na śrubę prostopadle do osi obrotu.

Składowa poosiowa fali uderzeniowej oddziałuje na łożysko oporowe, a jej charakter w postaci wymuszenia skokowego może całkowicie zniszczyć łożysko oporowe typu ślizgowe. Łożyska oporowe typu tocznego są znacznie bardziej wytrzymałe na obciążenia skokowe, stąd ich powszechność zastosowania w morskich konstrukcjach militarnych. Znacznie większe zagrożenie niesie ze sobą składowa prostopadła do osi obrotu wału. Fala uderzeniowa może spowodować uszkodzenie pochwy wału śrubowego, kruche pęknięcie pokryw i bieżni łożysk, plastyczne przemieszczenie elementów podtrzymujących wał, w tym przekładni i silnika, a w krytycznej sytuacji trwałe odkształcenie wału śrubowego.

Energia przekazywana przez falę uderzeniową może doprowadzić do plastycznego ugięcia kadłuba [4], co spowoduje zmiany w zakresie wzajemnego położenia geometrycznego elementów transmisji momentu obrotowego. Miarą przekroczenia tolerowanych parametrów współosiowości będzie wzrost poziomu drgań oraz zmiany w strukturze widma sygnałów drganiowych. Symptomatic odkształceń plastycznych kadłuba wywołanych obciążeniem impulsowym będą zmiany stosunków wartości przyspieszeń sprzed Ex_{BF} i po wybuchu Ex_{AF} w dowolnej osi i na dowolnym łożysku linii wałów. Odkształcenie sprężyste nie wprowadzi zmian w geometrii układu napędowego, co wyrazić można równaniem:

$$Ra = \frac{Ex_{BF}}{Ex_{AF}} = const \pm k, \quad (1)$$

gdzie:

$$Ex_{BF} = \frac{a_{max}}{a_{min}},$$

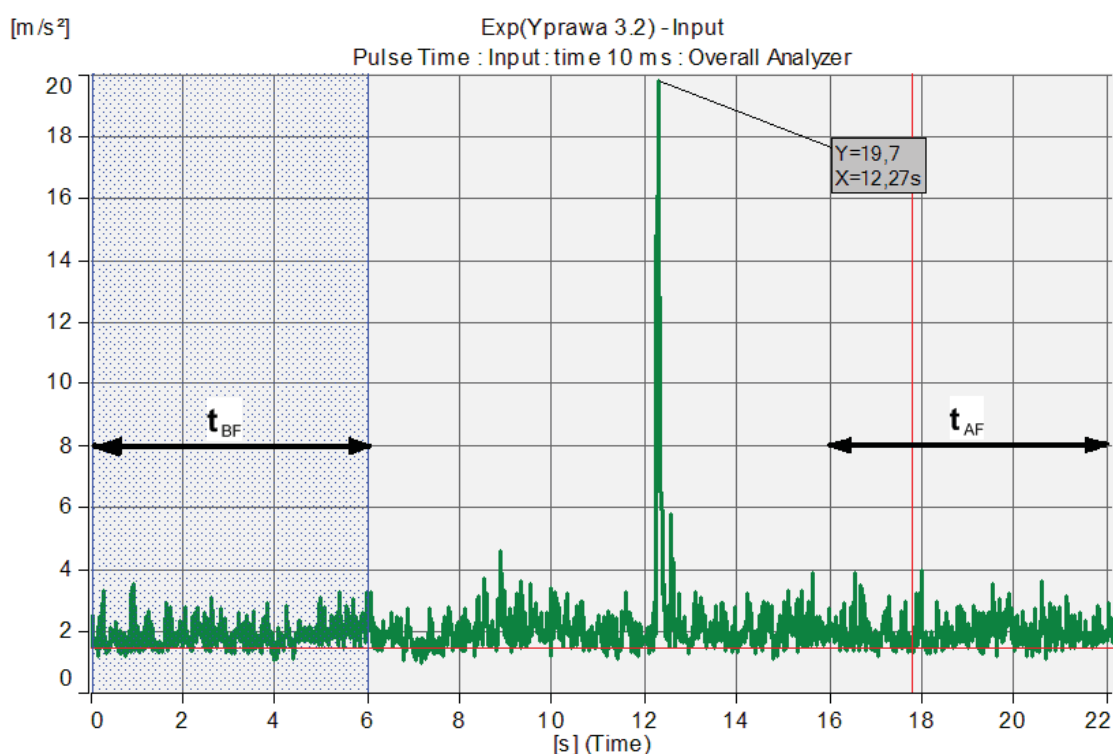
$$Ex_{AF} = \frac{a_{max}}{a_{min}},$$

a_{max} - wartość maksymalna przyspieszeń,

a_{min} - wartość minimalna przyspieszeń,

k - założony dopuszczalny błąd względny $\leq 10\%$.

Wartości maksymalne i minimalne z przebiegu czasowego wartości skutecznych przyspieszeń powinny być rejestrowane, przez, co najmniej, 6 sekund przed wybuchem oraz przez 6 sekund po wybuchu – rysunek 3.



Rys. 3. Zakres czasu pomiaru przyspieszeń przed i po detonacji

Fig. 3. Measuring time before and after explosion

Tab. 1. Wyniki analiz odkształcenia sprężystego kadłuba na przekładni redukcyjnej PB

Tab. 1. The result of analysis of the hull elastic displacement measured on the gearbox

Oś pomiarowa	PRZED DETONACJĄ				PO DETONACJI					
	a_{max} [m/s ²]	a_{min} [m/s ²]	a_{mean} [m/s ²]	Ex_{BF} [-]	a_{max} [m/s ²]	a_{min} [m/s ²]	a_{mean} [m/s ²]	Ex_{AF} [-]	Ra [-]	Sx [-]
PR oś V	10,3	5,04	7,35	2,043	10,7	5,12	7,45	2,089	1,022	1,013
PR oś H	7,76	3,44	5,18	2,255	7,54	3,61	5,18	2,088	0,926	1
PR oś L	12,2	2,77	6,13	4,4	12,6	2,86	6,51	4,4	1	1,062
Wzdłużnik oś V	5,81	2,84	4,33	1,645	5,41	3,24	4,34	1,669	1,014	1,002

Innym symptomem bezwymiarowym świadczącym o zmianie energii w układzie napędowym jest stosunek wartości średnich przyspieszeń przed po detonacji - Sx . Im bliższy jest on wartości "1", tym mniejsze zakłócenia wprowadziła detonacja w układzie napędowym.

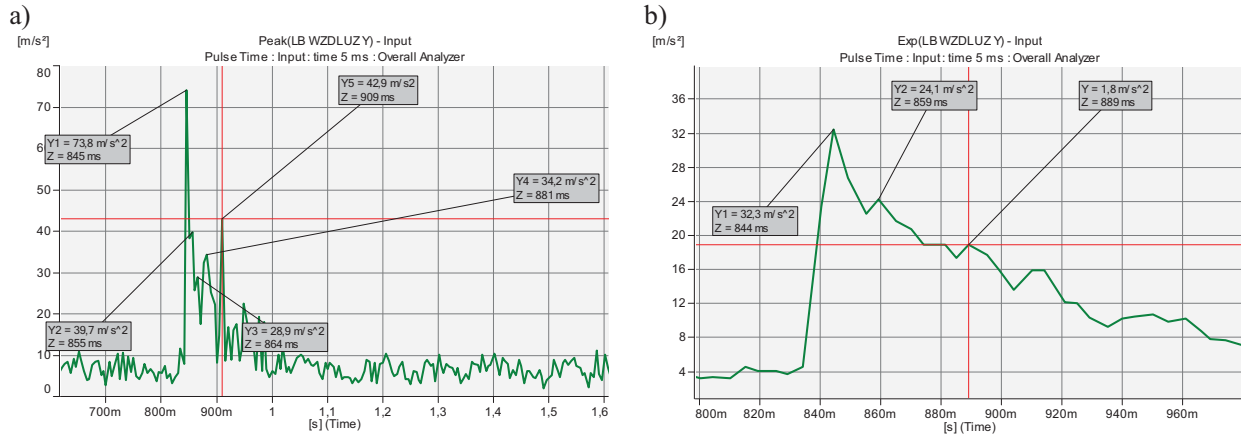
$$Sx = \frac{a_{meanAF}}{a_{meanBF}} \cong 1, \quad (2)$$

gdzie:

a_{meanAF} – wartość średnia przyspieszeń sprzed wybuchu,
 a_{meanBF} – wartość średnia przyspieszeń po wybuchu.

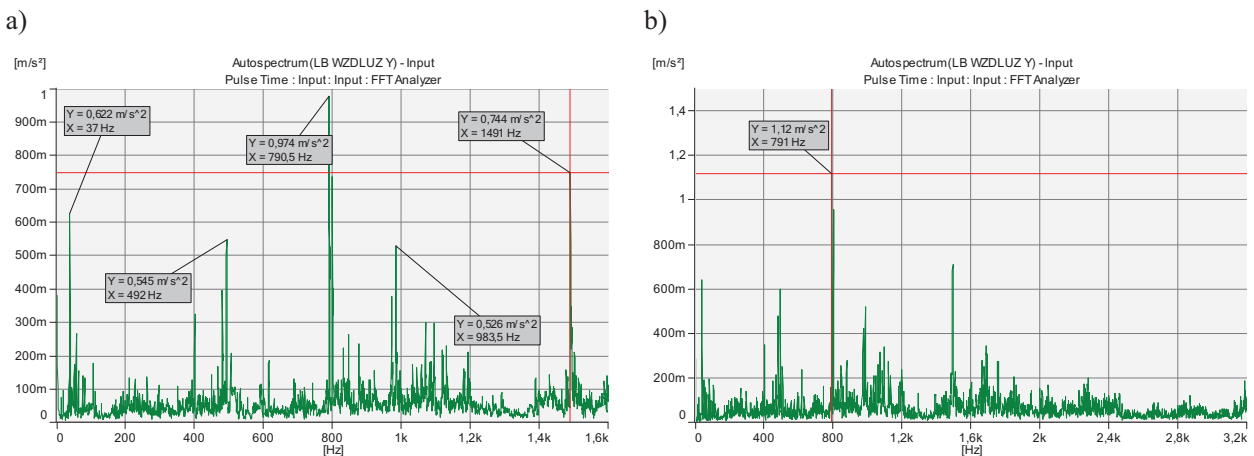
Identyfikacja impulsów powinna być analizowana nie jako wartość skuteczna – rysunek 4 (a), lecz jak wartość szczytowa – rysunek 4 (b).

Przykładowe wyniki badań z łożyska oporowo-nośnego przedstawia tabela 1.



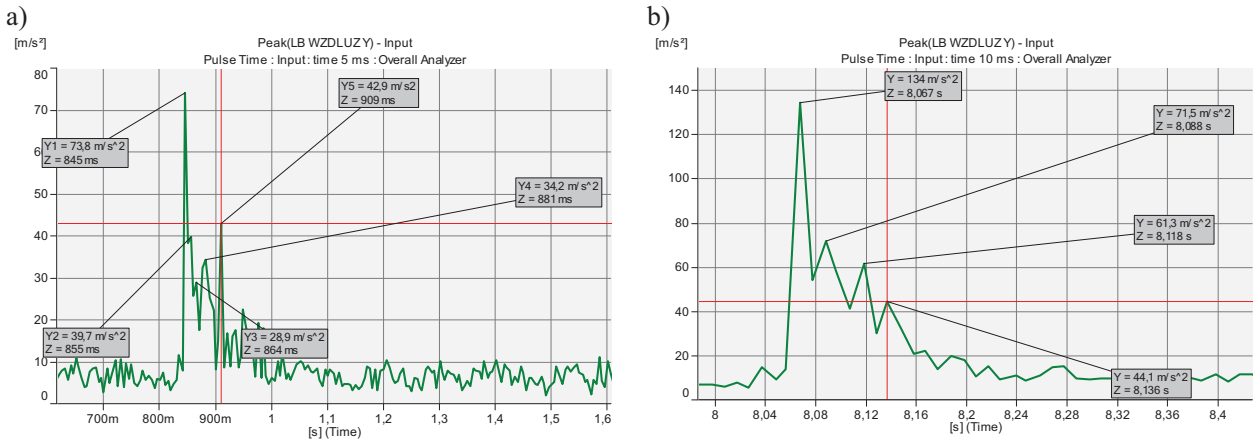
Rys. 4. Porównanie wyników analiz pulsacji pęcherzy przy wykorzystaniu wartości szczytowej (a) i wartości skutecznej przyspieszeń (b)
 Fig. 4. The comparing of the signal analysis using RMS (b) and Peak value (a) of the acceleration

Pozwala to na dokładniejsze odtworzenie czasu narastania, wartości szczytowych oraz określenie okresów pulsacji. Należy zaznaczyć, że wartość szczytowa odnosi się jedynie do prążków charakterystycznych i nie niesie informacji o przekazywanej energii do obiektu. Oczywiście jest, że analiza wpływu detonacji powinna być odnoszona do ładunków o identycznej masie (odniesionej do TNT), inicjowanych przy tym samym kursie, prędkości i odległości od epicentrum. Ocena energetyczna detonacji jest zawarta w wartości skutecznej przyspieszeń w zakresie filtra środkowo-przepustowego od 0,7 Hz do 1,6 kHz – rysunek 5 [6]. Wybór częstotliwości próbkowania powinien być wynikiem analiz teoretycznych oraz wyników badań pilotażowych. W przypadku ładunków 40 kg i odległości od epicentrum wynoszącej 400 m podwyższanie zakresu analizowanych częstotliwości powyżej 1,6 kHz mija się z celem, gdyż składowe powyżej 1,5 kHz nie wnoszą istotnych informacji o charakterze oraz energii wybuchu.



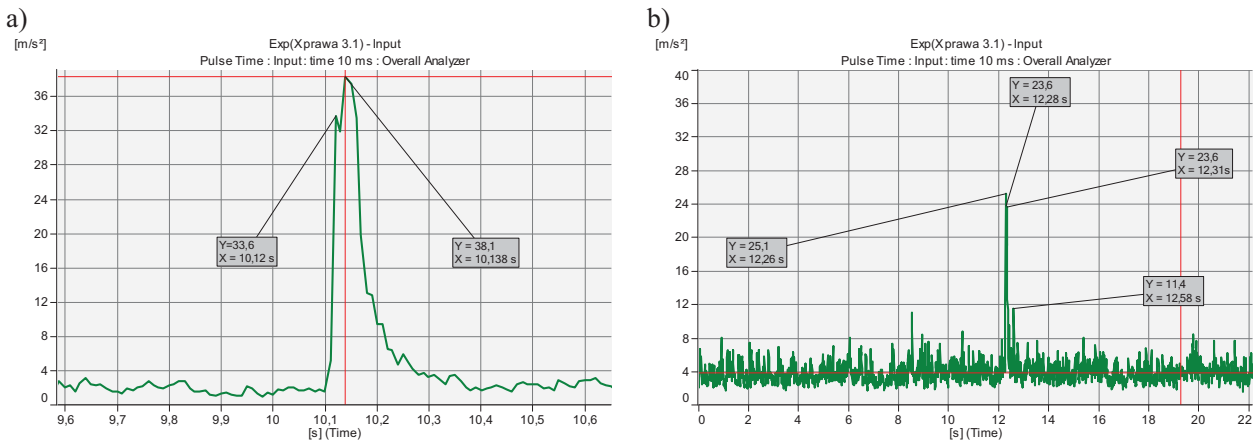
Rys. 5. Porównanie analiz przy różnych zakresach częstotliwości: 1,6 kHz (a) i 3,2 kHz (b)
 Fig. 5. The comparing of the signal analysis results in two frequency bands: 1,6 kHz (a) and 3,2 kHz (b)

Wybór kroku czasowego powinien uwzględniać charakter fizyczny procesu. Zbyt krótki krok może znacząco ograniczyć możliwości analityczne analizatora, szczególnie, gdy nie możemy precyzyjnie przewidzieć czasu detonacji. Krok zbyt długi spowodować może uśrednienie wartości kolejnych pulsacji, a nawet ich eliminację w przebiegu czasowym – rysunek 6.

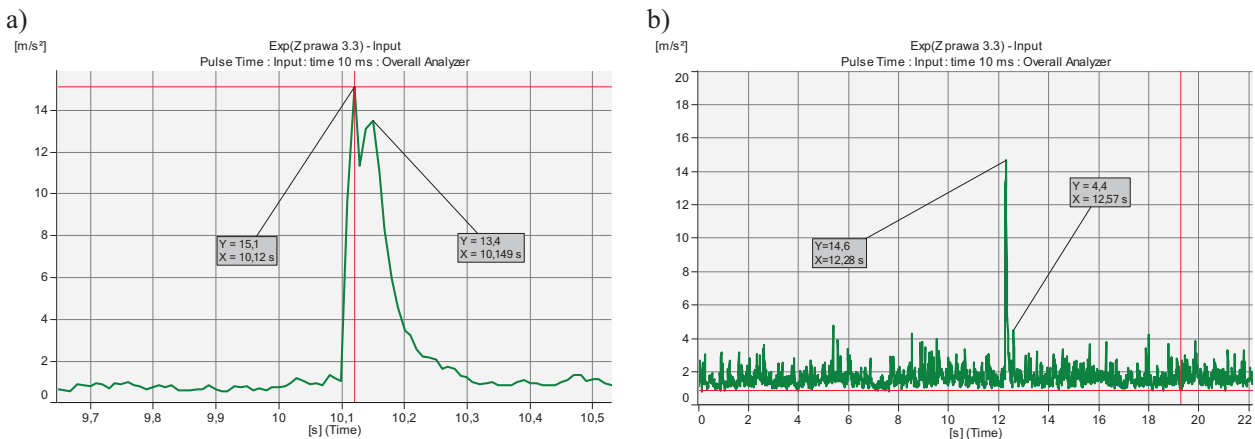


Rys. 6. Porównanie analiz przy kroku $t=5$ ms (a) i $t=10$ ms (b)
 Fig. 6. The comparing of the signal analysis results for $t=5$ ms (a) i $t=10$ ms (b) time steps

Lokalizacja ćwiczebnego ładunku wybuchowego jest istotnym zagadnieniem przy ocenie odporności udarowej okrętu.



Rys. 7. Porównanie oddziaływań w osi H przy dla detonacji nr 1 (a) i nr 2 (b)
 Fig. 7. The comparing of the two explosion effects: explosion 1(a) and 2 (b) (Axis H)



Rys. 8. Porównanie oddziaływań w osi L przy dla detonacji nr 1 (a) i nr 2 (b)
 Fig. 8. The comparing of the two explosion effects: explosion 1(a) and 2 (b) (Axis L)

Przedstawiony eksperyment dostarczył informacji, które potwierdziły, że lokalizacja ładunku poza płaszczyzną symetrii kadłuba naraża okręt na większe oddziaływania w osi H – rysunki 2 i 7, natomiast nie wpływa na oddziaływania w osi V i L – rysunek 8.

6. Wnioski

Zaproponowana procedura pomiarowa pozwala na dostatecznie dokładny opis oddziaływań eksplozji podwodnych na elementy okrętowego układu przeniesienia mocy.

Czasochłonność oraz wysokie koszty badań z wykorzystaniem podwodnych detonacji wymagają staranności w przygotowaniu czynnego eksperymentu badawczego. Właściwy dobór konfiguracji pomiarowej pozwala uniknąć przerw w badaniach oraz ogranicza wymaganą pojemność nośnika danych. Uzyskane wyniki mogą zostać analizowane sprawnie przy wcześniej przygotowanych projektach analitycznych. Wyniki analiz, przy stałych nastawach kroku czasowego, częstotliwości próbkowania, sygnału synchronizującego okna czasowego itd, mogą być wprowadzane wprost do baz danych, a następnie przetwarzane przez diagnostyczne systemy monitoringu typu *on-line* [7].

Przedstawione rezultaty wykonanych badań pozwalają na:

- Opracowanie właściwej procedury pomiarowej;
- Weryfikację stosowanych modeli systemów diagnostycznych.

Należy sądzić, że w dalszych pracach uda się zarówno zaprojektować układ odfiltrujący zakłócenia pochodzące od wybuchów jak i system ostrzegania o trwałych niebezpiecznych skutkach eksplozji dla układu napędowego.

Literatura

- [1] Cole, R. H., *Underwater Explosions*, Princeton University Press, Princeton 1948.
- [2] Dąbrowski, Z., *Wały maszynowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN 1999.
- [3] Dąbrowski, Z., *Wykorzystanie efektu rezonansu nieliniowego jako symptomu w diagnozowaniu silników turbinowych*, III Sympozjum Naukowo-Techniczne "Silniki Spalinowe w Zastosowaniach Wojskowych", Jurata, 1997.
- [4] Dobrociński, S., Flis, L., Szturomski, B., *Określenie obciążeń pojazdu morskiego od impulsu ciśnienia fali uderzeniowej*, III Konferencja Naukowo-Techniczna, Rynia 2002.
- [5] Grządziela, A., *Application of vibration measurement for diagnosing the shafting alignment*, 10th ICSV – International Congress of Sound and Vibration, Szwecja, Stockholm, 05.07.2003 – 11.07.2003.
- [6] Grządziela, A., *An analysis of possible assessment of hazards to ship shaft line, resulting from impulse load*, Polish Maritime Researches 2007, no 3, pp. 29 – 30, 1999.
- [7] Krzyworzeka, P., *Wspomaganie synchroniczne w diagnozowaniu maszyn*, ITE. Radom. 2004.
- [8] Powierża, Z., *Wytrzymałość ogólna kadłuba okrętu przy niekontaktowych wybuchach podwodnych*, Zeszyty Naukowe AMW no 108. Gdynia, 1991.