

Polski Rejestr Statków

PUBLIKACJA INFORMACYJNA NR 2/1

ZAPOBIEGANIE DRGANIOM NA STATKACH

2004



GDAŃSK

Polski Rejestr Statków

PUBLIKACJA INFORMACYJNA NR NO. 2/I

ZAPOBIEGANIE DRGANIOM NA STATKACH

2004

Publications I (Informative) are issued by Polski Rejestr Statków
as guidance or explanatory notes to PRS Rules.



GDAŃSK

Niniejsza Publikacja została zaakceptowana przez Dyrektora Okręgowego Polskiego Rejestru Statków S.A. w dniu 8 listopada 2004 roku.

© Copyright by Polski Rejestr Statków, 2004

PRS/HW, 12.2004

ISBN 83-89895-29-3

Wstęp	5
1 Wskazania ogólne	7
1.1 Zakres zastosowania	7
1.2 Zakres nadzoru	8
1.3 Określenia i objaśnienia wyrażeń stosowanych w tekście i załącznikach	8
2 Zapobieganie drganiom na etapie projektowania statku	14
2.1 Uwagi wstępne	14
2.2 Prognoza drgań ogólnych kadłuba	14
2.3 Prognoza wymuszeń pochodzących od śruby napędowej	16
2.4 Prediction of shafting vibration	16
2.5 Prognoza drgań maszyn pomocniczych i wyposażenia	17
2.6 Prognoza drgań lokalnych kadłuba	17
3 Pomiary i kryteria oceny drgań	18
3.1 Zakres pomiarów	18
3.2 Program pomiarów	19
3.3 Warunki na próbach	20
3.4 Kryteria i reguły ich stosowania	21
3.5 Ocena wyników i wnioski z pomiarów	26
3.6 Sprawozdania z pomiarów	27
Załączniki	
1 Wykaz ważniejszych publikacji normalizacyjnych	
2 Kryteria zdrowotne oceny drgań	
3 Informacja o niektórych programach obliczeniowych z zakresu drgań konstrukcji okrętowych	
4 Przybliżone wyznaczanie częstości drgań własnych kadłuba	
5 Wpływ fali regularnej na drgania rezonansowe kadłuba	47
6 Ocena prześwitu okna śrubowego w kierunku pionowym	49
7 Wskaźnik do oceny niejednorodności pola prędkości oparty na wynikach pracy holdena	
8 Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych niepoprawnych ze względu na powstawanie i rozprzestrzenianie się drgań	
9 Bibliografia	58

WSTĘP

Ujemne skutki drgań znajdują się od lat w polu uwagi instytucji klasyfikacyjnych. Wiadomo z wieloletnich doświadczeń, że drgania powodować mogą:

- uszkodzenie konstrukcji, bądź zmniejszenie jej trwałości na skutek zmęczenia materiałów;
- niesprawność działania, bądź awarie maszyn i wyposażenia;
- odczucie uciążliwości dla załogi i związane z tym zmniejszenie sprawności obsługi;
- hałas, który w wieloraki sposób oddziałuje ujemnie na samopoczucie i zdrowie załogi.

Mimo znajomości ogólnej, tak przyczyn, jak i skutków drgań, żadna z instytucji klasyfikacyjnych nie wydała dotąd postanowień o charakterze przepisów wiążących nadanie statkowi klasy ze spełnieniem określonych kryteriów antywibracyjnych. Instytucje te ograniczają się na ogół w swoich publikacjach do zaleceń i wskazań ogólnych, zaś praktyczne ich interwencje wynikają ze statutowych podstaw działalności, które podobnie jak *Zasady działalności nadzorczej PRS* umożliwiają interwencję inspektorom, gdy skutki drgań są zauważalne.

Działania na etapie zdawczo-odbiorczym statku mogą pomóc jedynie w usunięciu niektórych tylko drgań lokalnych, zaś poważniejsze zmiany konstrukcji są wtedy nie do przyjęcia z powodu nadmiernych kosztów. Stąd też coraz szersze zainteresowanie instytucji klasyfikacyjnych możliwościami skutecznego zapobiegania drganiom na etapie projektowania statku.

Potrzeba wydania przez PRS publikacji informacyjnej z możliwością jej opcyjnego stosowania w postępowaniu nadzorczym wydaje się oczywista i z tej choćby racji, że różnice zdań między producentem a nabywcą (stocznia i armatorem) w kwestiach oceny drgań wymagają pewnej obiektywizacji, tak co do samych wartości liczbowych proponowanych jako kryteria graniczne, jak też co do zakresu najbardziej niezbędnych przedsięwzięć profilaktycznych w całym procesie powstawania statku.

Niniejsza publikacja proponuje procedurę stwarzającą dość duże szansę uniknięcia przypadków pojawienia się drgań jako „zrządzenia losu”, na które w etapie zdawczo-odbiorczym statku w rozsądnych granicach kosztów poradzić nie można.

Oczywiście Publikacja 2/1 nie powinna być uważana za skodyfikowany konspekt poprawnego projektowania, który stwarzałby iluzoryczną pewność, że statek będzie wolny od nadmiernych drgań, zwłaszcza zaś statek o cechach nowatorskich. Dla takich właśnie statków obciążenia dynamiczne mogą nawet dwu- i trzykrotnie przekroczyć założone obciążenia statyczne, czego przyczyna tkwi w dość „gęstym” polu zagrożeń rezonansami w paśmie częstotliwości niskich (0,5 do ok. 50 Hz) przy jednocześnie niskich wartościach tłumienia w konstrukcjach stalowych. W najbardziej ogólnym ujęciu sprowadza się to do przeanalizowania dwóch przyczyn nadmiernych drgań:

- Wymuszeń od składowych zmiennych sił i momentów powstających na skrzydłach śruby napędowej i na powierzchni poszycia w rejonie tej śruby

- oraz od sił i momentów przekazywanych kadłubowi przez zainstalowane w nim silniki główne i pomocnicze, a przede wszystkim silniki tłokowe;
- odzewu konstrukcji na wyżej wymienione wymuszenia, który to odzew jest szczególnie niebezpieczny w rezonansach, z czego wynika konieczność wyznaczenia częstotliwości drgań własnych, tak dla całego kadłuba, jak i dla poszczególnych jego podzespołów konstrukcyjnych (tzw. drgania-lokalne).

Publikację uzupełniono kilkoma załącznikami stanowiącymi szczegółowe informacje, które służyć mogą głównym wskazaniom proceduralnym zawartym w tekście rozdziałów 2 i 3. Potrzeba zredagowania załączników wynika z niedostatku opracowań monograficznych w dziedzinie drgań okrętowych.

Do czasu opublikowania wymagań o charakterze przepisów *Publikacja 2*//może okazać się, zdaniem PRS, pomocna jako próba uporządkowania dość złożonej sprawy skutecznego zapobiegania drganiom. Szczególną rolę w tej dziedzinie PRS upatruje we właściwej współpracy pomiędzy armatorem a stoczną oraz stoczną a producentami wyposażenia.

1 WSKAZANIA OGÓLNE

1.1 Zakres zastosowania

1.1.1 Wskazania zawarte w niniejszej publikacji mogą być zastosowane w działalności PRS w tych wszystkich przypadkach, gdy na podstawie osobnych uzgodnień pomiędzy armatorem, stoczną a producentami wyposażenia lub innymi zainteresowanymi stronami zostaną one przywołane w umowach wiążących te strony, (patrz: *Zasady działalności nadzorczej* p. 4.7, 4.8, 5.4).

Działalność nadzorcza realizowana jest na podstawie osobnego zlecenia udzielonego PRS przez jedną ze stron.

1.1.2 Wskazania zawarte w niniejszej publikacji mogą być również stosowane w całości lub w odpowiedniej części, jeżeli w trakcie rozpatrywania dokumentacji statku, PRS uzna, że ze względu na cechy konstrukcji konieczne i celowe jest rozszerzenie wymagań zawartych w *Przepisach klasyfikacji i budowy statków morskich* o wskazania niniejszej publikacji.

1.1.3 Wskazania zawarte w niniejszej publikacji mają zastosowanie do:

- .1** statków o pojemności brutto 1600 gt i większej;
- .2** statków towarowych o pojemności mniejszej niż 1600 gt w tych szczególnych przypadkach, gdy spełnienie wskazań w całości, bądź w odpowiedniej części zapewni poprawniejszą konstrukcję z uwagi na drgania; w szczególności odnosić się to może do oceny drgań maszyn i mechanizmów.

1.1.4 Spełnienie podanych w tej publikacji wartości kryterialnych dla oceny drgań nie zwalnia z obowiązku spełniania norm lub aktów państwowych o charakterze normatywnym, dotyczących ochrony zdrowia ze względu na drgania na stanowiskach pracy ciągłej, okresowej i dorywczej oraz w miejscach wypoczynku załogi. Przywołanie niniejszej publikacji w umowie, o której mowa w 1.1.1 nie oznacza, że kryteria zdrowotne zostały określone. Sprawa ta wymaga odrębnego uzgodnienia między armatorem i stoczną. Załącznik 2 podaje podstawowe informacje, które mogą być w tym przydatne.

Sprawy ochrony zdrowia i wynikające stąd, między innymi, wymagania dotyczące komfortu drganiowego w pomieszczeniach mieszkalnych i na stanowiskach pracy nie są przedmiotem nadzoru PRS.

1.1.5 Przedmiotem tej publikacji są drgania na statkach i niektóre sposoby zapobiegania. Obniżenie poziomu drgań zmniejsza hałas, jednakże przedsięwzięcia wynikające z rozdziału 2 nie powinny być jednak w żadnym przypadku uważane za konstrukcyjne środki przeciwdziałania hałasom uzgodnione z PRS, bądź przez PRS zalecane.

1.1.6 Merytoryczny zakres zjawisk drganiowych objętych tą publikacją określono w 1.3.2.1.

1.2 Zakres nadzoru

1.2.1 Nadzór PRS, o którym mowa w 1.1.1 i 1.1.2 sprawowany jest w trybie określonym w rozdz. 4 *Zasad działalności nadzorczej*.

1.2.2 W przypadku udzielenia PRS zlecenia na nadzór należy:

- .1** przedstawić PRS do wglądu dokumentację techniczną, w szczegółowym zakresie każdorazowo uzgodnionym z PRS. Zakres tej dokumentacji powinien być taki, aby można było ustalić, czy spełnione są główne wskazania zawarte w rozdziale 2 niniejszej publikacji, a mianowicie:
 - uniknięcie znaczących drgań rezonansowych w ogóle oraz nadmiernych amplitud drgań wymuszonych;
 - zastosowanie w konstrukcji i w wyposażeniu statków środków zapobiegających pojawianiu się drgań o natężeniach szkodliwych.
- .2** umożliwić PRS pełną ocenę stanu drgań poprzez przedstawienie szczegółowych wyników pomiarów i badań dokonanych w czasie prób morskich i na uwięzi, a w koniecznych przypadkach również w czasie eksploatacji (patrz rozdział 3 p. 3.2.2).

1.3 Określenia i objaśnienia wyrażen stosowanych w tekście i załącznikach

1.3.1 Uwagi ogólne

- .1** Terminy i pojęcia z zakresu drgań mechanicznych i metrologii drganiowej zgodne są ze stosowanymi w wydawnictwach Polskiego Komitetu Normalizacyjnego (patrz załącznik 1).
- .2** Wobec braku wiążących ustaleń w nazewnictwie dla drgań okrętowych wprowadza się w 1.3.2 określenia wielkości mierzalnych, a w 1.3.3 objaśnienia takich terminów, których rozumienie i stosowanie w praktyce nadzorczej i pomiarowej musi być jednolite. Nie oznacza to jednak, że podane znaczenia mają charakter, zakres i formę definicji ścisłych.
- .3** Podane w 1.3.2 i 1.3.3 pozycje nie wyczerpują potrzeb w tej kwestii i, przykładowo, określenia rodzajów drgań, takich jak: swobodne (własne), wymuszone, rezonansowe, pozarezonansowe, samowzbudne, tłumione, parametryczne, nieliniowe itp. — można znaleźć, jeżeli zajdzie konieczność, w publikacjach PKN, bądź książkowych z tej dziedziny. Publikacja niniejsza nie wprowadza żadnych znaczeń odmiennych od już przyjętych lub zwyczajowo utartych.

1.3.2 Określenia

1.3.2.1 **Drgania** – zmienność w czasie pewnej wielkości charakteryzującej położenie ciała w układzie mechanicznym, przy czym wielkość ta jest na przemian większa lub mniejsza od pewnej wartości średniej lub od przyjętego położenia odniesienia (np. spoczynkowego). Wielkość ta może być zmienna w czasie w sposób zeterminowany lub w sposób przypadkowy, jako tzw. wielkość losowa.

Publikacja 2/1 ujmuje tylko drgania:

- **z d e t e r m i n o w a n e**, czyli takie drgania, których wartości charakterystyczne mogą być przewidziane na podstawie ich przebiegu w czasie poprzedzającym oraz.
- **s t a c j o n a r n e**, czyli te z drgań losowych, które spełniają warunki procesu stochastycznego stacjonarnego, w którym wartość średnia przebiegu i funkcja autokorelacji, określone z jednej realizacji (próbki) pobranej w skończonym przedziale czasu, nie zależą od czasu pobrania tej próbki.

Dla większości przypadków drgań na statkach określenia powyższe będą w praktyce równoznaczne z drganiami okresowymi lub z obejmowanymi potocznie (aczkolwiek nieścisła) nazwą **d r g a n i a u s t a l o n e**.

1.3.2.2 Drgania losowe niestacjonarne i nieustalone (przejściowe) – drgania, dla których średnia badanego parametru jest zmienna w czasie. Dla statku są to drgania wymuszane przez siły pochodzące ze środowiska, czyli wywołane np. uderzeniami fal o kadłub (m.in. slamming, slaping, whipping), bądź ruchami kadłuba na fali, a także drgania od innych wymuszeń losowych pojawiających się wewnątrz statku. Ten rodzaj drgań nie jest przedmiotem publikacji.

1.3.2.3 Drgania mechaniczne – drgania, w których wielkości kinematyczne lub dynamiczne charakteryzujące stan całego układu mechanicznego, bądź jego punktu lub elementu są funkcją czasu.

Parametrami drgań mechanicznych są mierzalne wielkości fizyczne charakteryzujące ruch drgający: wartość wychylenia pewnej wielkości, jej składowe dyskretne, częstotliwość, faza i inne.

1.3.2.4 Drgania czynne – drgania występujące w danym mechanizmie i w jego bezpośrednim otoczeniu (np. fundamencie, wspornikach itp.) w czasie gdy on pracuje, a zanikające po jego zatrzymaniu.

1.3.2.5 Drgania bierne – drgania, które występują w danym mechanizmie, niezależnie od tego czy on pracuje czy nie, a pobudzany jest wymuszeniami zewnętrznymi, pochodzącymi od otoczenia (np. drganiami kadłuba lub sąsiedniej maszyny).

1.3.2.6 Amplituda – wartość najwyższa wielkości sinusoidalnie zmiennej. Termin ten nie jest zalecany przez ISO dla drgań mechanicznych spotykanych w praktyce inżynierskiej.

Dla określenia współrzędnej charakteryzującej drgania mechaniczne stosuje się termin wartość, w kilku odmianach znaczeniowych, podanych w 1.3.2.7 do 1.3.2.11 i na rys. 1.3.2.6.

1.3.2.7 Wartość szczytowa (peak value) – wielkości zmiennej to najwyższa bezwzględna wartość tej wielkości, charakteryzującej drgania w określonym (rozpatrywanym) przedziale czasu.

1.3.2.8 Wartość międzyszczytowa (peak to peak value) – bezwzględna wartość różnicy między wychyleniem największym i najmniejszym, zwana też niekiedy amplitudą całkowitą drgań.

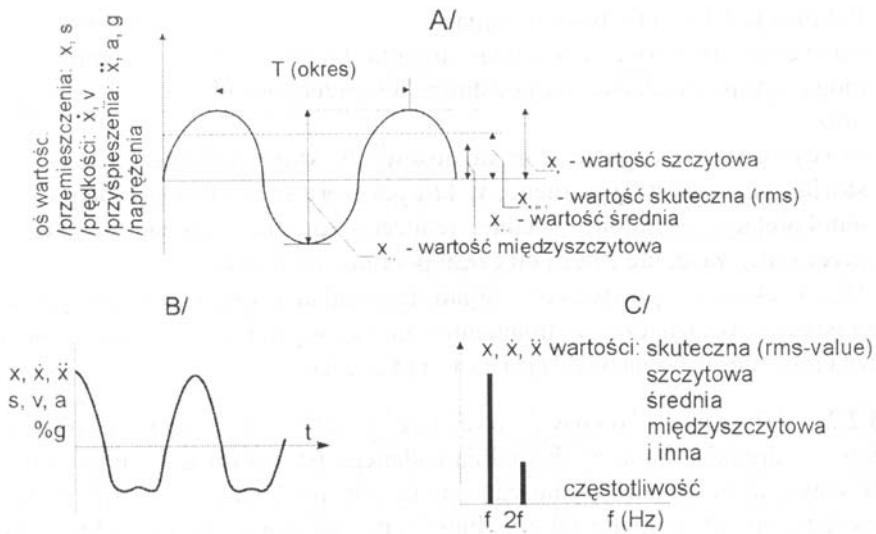


Fig. 1.3.2.6 Graficzne objaśnienia terminów:

- A) sygnał drgania prostego, przebieg czasowy
- B) sygnał drgania złożonego: przebieg czasowy i obraz w funkcji częstotliwości
- C) przypadek B, (w zależności od częstotliwości)

1.3.2.9 Wartość średnia modułu wielkości zmiennej (tzw. wartość wyprostowana) wyraża się wzorem:

$$x_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (1.3.2.9)$$

T – czas uśredniania
 $|x(t)|$ – wartość absolutna

Wielkość ta nazywana jest też absolutną wartością średnią przebiegu („average absolute value” lub „mean absolute value”).

1.3.2.10 Wartość skuteczna albo efektywna (RMS skrót od: root mean square) wyraża się wzorem:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1.3.2.10)$$

T – czas uśredniania

Nazywana jest też średnią wartością skuteczną lub średnią kwadratową przebiegu funkcji w czasie. W teorii drgań wielkość ta równa się tzw. odchyleniu standardowemu (standard deviation), zaś wyrażenie pod pierwiastkiem oznacza wariancję procesu drganiowego.

1.3.2.11 W czynnościach analityczno-obliczeniowych, normalizacyjnych, bądź w badaniach pomiarowych każda z wyżej wyszczególnionych wartości może odnosić się do:

- .1 pewnej określonej częstotliwości, i jest to wtedy tzw. wartość d y s k r e t n a;
- .2 określonego przedziału częstotliwości, i jest to wtedy wartość p a s m o w a, np. tercjowa, oktawa, dekadowa bądź inna, zależnie od zastosowanej bramki filtrującej (przykłady takich wartości – patrz załącznik 2)
- .3 całego zakresu częstotliwości, w którym zjawisko drgań jest analizowane obliczeniowo, bądź pomiarowo, i jest to wtedy tzw. wartość całkowita (g l o b a l n a) potocznie zwana l i n i o w ą lub l i n e a r n ą i charakteryzuje ona sumę (superpozycję) składową dyskretnych lub ciągłych danego drgania tak, jak odbierane jest ono przez czujnik pomiarowy, tworząc w nim sygnał wskaźwany przez miernik z ominięciem ewentualnych filtrów; wielkości te podaje się wraz z szerokością zakresu np. 2-100 Hz, 10-1000 Hz itp., przykładem zbioru takich wartości jest tablica 3.4 i rys. 3.4.

1.3.2.12 Analiza widmowa (spektralna) drgań – jest to przedstawienie wielkości charakterystycznych przebiegu drganiowego w funkcji częstotliwości. Uzyskuje się ją poprzez analizę Fouriera, obliczeniową lub pomiarową, która informuje o składowych danego przebiegu. Dla drgań zdeterminowanych będzie to widmo (spektrum) dyskretne, zwane też liniowym, zaś dla procesów stochastycznych widmo ciągłe, zwane też funkcją gęstości widmowej energii drgań (szersze i ściśle określenia - patrz poz. 3 do 6 w załączniku 1).

1.3.2.13 Analiza widmowa pasmowa – analiza procesu drganiowego, w której wartości skuteczne, szczytowe lub inne wyznacza się w całym charakterystycznym dla badanego zjawiska zakresie częstotliwości, w drodze przepuszczania przez pasma filtrujące sygnału proporcjonalnego do wartości globalnej. Pasma te mogą mieć szerokość stałą (np. 3 Hz, 10 Hz) lub stałoprocentową, charakteryzowaną stosunkiem szerokości pasma filtrującego (tzw. bramki) do częstotliwości środkowej tego pasma:

$$\frac{\Delta f}{f_o} = 23\% \text{ dla tercji};$$

$$\frac{\Delta f}{f_o} = 70.7\% \text{ dla oktawy}.$$

Pasma charakteryzuje się z kolei stosunkiem swoich granicznych częstotliwości odcinających górnej do dolnej, wynoszącym dla:

dekady	10,
oktawy	2,
półoktawy	$\sqrt{2}$,
tercji	$\sqrt[3]{2}$.

oraz częstotliwością środkową obliczoną jako średnia geometryczna częstotliwości górnej i dolnej pasma.

Częstotliwości środkowe pasm, uszeregowane kolejno stanowią, zazwyczaj w skali logarymicznej, oś zmiennej niezależnej dla wykresnej charakterystyki widma. Szeregi tych liczb zostały znormalizowane (patrz poz. 6 w załączniku 1).

Dla drgań okrętowych najczęściej wystarcza analiza tercjowa w zakresie od 0,5 Hz do około 200 Hz..

1.3.2.14 C z ę s t o t l i w o ść, f [Hz] – odwrotność okresu drgań równa liczbie okresów drgań w ciągu jednej sekundy.

1.3.2.15 O k r e s d r g a ń, T (s) – najmniejszy przedział czasu, po którym w drganiach okresowych powtarza się każda wartość wielkości zmiennej, charakteryzującej te drgania.

1.3.2.16 P o z i o m d r g a ń (lub poziom wibracji) wyraża logarytm stosunku danej wartości amplitudy JC do przyjętego poziomu odniesienia x_0 , wg wzoru.

$$N = 20 \log \frac{x}{x_0} \quad \text{dB} \quad (1.3.2.16)$$

Przyjmuje się następujące wartości progowe zalecane w normach dla parametrów:

- przyspieszenia – $a_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$,
- prędkości – $v_0 = 10^{-8} \text{ m/s}$,
lub – $v_0 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$,
- przemieszczenia – $d_0 = 10^{-11} \text{ m}$.

1.3.3 Objaśnienia

B e l k a k a d ł u b a – umowny model belki niejednorodnej, równoważnej kadłubowi od jego stępki do górnego pokładu ciągłego (wytrzymałościowego), charakteryzującej się zmiennością rozkładu geometrycznego, tak samych mas, jak i cech sprężystych (tu głównie: sztywności giętnej i skrętnej).

D r g a n i a o g ó l n e k a d ł u b a – stany, w których cały kadłub znajduje się w złożonym stanie drgań, z których umownie wyodrębnia się najczęściej: drgania poprzeczne czyli pionowe giętne i poziome giętne oraz drgania giętno-skrętne i wzdłużne. Każde z tych drgań ma swe częstotliwości własne i odpowiadające im formy odkształceń sprężystych.

W drganiach ogólnych kadłuba wyodrębnia się najczęściej:

- drgania belki kadłuba;
- drgania rufy, czyli drgania belki kadłuba, ale rozpatrywane oddzielnie dla dłu gości około $0,3 L$ od rufy, przede wszystkim z uwagi na wymuszenia siłami w łożysku rufowym i ciśnieniami na poszyciu nad śrubą;
- drgania nadbudówki, jako odrębnej bryły posadowionej sztywno, bądź podatnie na belce kadłuba.

Drgania lokalne – drgania poszczególnych, dających się miejscowo wyodrębnić podzespołów konstrukcyjnych kadłuba (np. rusztu dennego, grodzi, pokładu, ścianki, płyty, części nadbudówki itp.), które swoją amplitudą przewyższają drgania belki kadłuba w tym rejonie i są zarazem odpowiedzią danej części konstrukcji na wzbudzenia pochodzące od układu napędowego, od maszyn pomocniczych lub od wyżej określonych drgań ogólnych kadłuba. Drgania lokalne nazywane są też wzmocnieniami miejscowymi drgań kadłuba, jeśli zaś pojawią się na wyposażeniu mocowanym sztywno, to objawiają się one jako drgania bierne wyposażenia.

Drgania pochodzące od śruby napędowej obejmują:

– drgania rezonansowe i wymuszone poza obszarem rezonansów rufy, o częstotliwościach:

$$f = n, 2n, nz, 2nz, 3nz, 4nz;$$

gdzie

n – obroty wału śrubowego, 1/s;

z – liczba skrzydeł śruby;

– drgania lokalne na rufie o którejkolwiek z wyżej wymienionych częstotliwości, wliczając tu też nadbudówkę, jeżeli mieści się ona w rejonie 0,31 od pionu rufowego.

Drgania pochodzące od silników głównych – drgania nie dające się identyfikować jako pochodzące od śruby, a mające częstotliwości wymienione w tabelach niezrównoważonych składowych harmonicznym sił bezwładności i w tabelach analizy harmonicznym momentu obrotowego. W większości przypadków częstotliwości dominujące wyznaczyć można ze wzoru:

$$f = k \cdot m \cdot i \cdot n$$

gdzie

$k = 1, 2, 3 \dots$ do ok. 4i;

$m = 0.5$ dla silnika 4-suwowego;

$m = 1.0$ dla silnika 2-suwowego;

i = liczba cylindrów;

n = liczba obrotów wału silnika, 1/s.

Wzór powyższy nie obejmuje silników dwusuwowych o tzw. podwójnym zapłonie lub o konstrukcji nietypowej, stąd też najlepiej oprzeć się na danych uzyskanych od producenta.

Do tej grupy wlicza się także drgania o częstotliwościach pochodzących z przekładni oraz z innych urządzeń transmisji mocy napędowej.

Drgania wyposażenia maszynowego są to drgania występujące na:

- głównych więzach układu kinematycznego maszyny, takich jak: łożyska, prowadnice, przeguby i inne,
- elementach rozrządu, sterowania i regulacji,
- głównych więzach statycznych maszyny, znajdujących się w strumieniu linii sił, takich jak: stojaki, ramy, łapy fundamentowe, korpusy i inne.

2 ZAPOBIEGANIE DRGANIOM NA ETAPIE PROJEKTOWANIA STATKU

2.1 Uwagi wstępne

2.1.1 Zapobieganie drganiom w procesie projektowania statku polega na obliczeniowym rozpoznaniu zagrożeń i następnie przedsięwzięciu środków przeciwko wystąpieniu:

- rezonansowych drgań kadłuba (ogólnych i lokalnych) oraz wyposażenia,
- nadmiernych amplitud w drganiach wymuszonych (poza punktami rezonansów),
- sytuacji niekorzystnych konstrukcyjnie, bądź niepoprawnych ze względu na powstawanie i rozprzestrzenianie się drgań; niektóre przykłady takich rozwiązań podano w załączniku 8.

Pełne rozeznanie obliczeniowe zagrożeń drganiowych wymaga wykonania wielu prognoz dla różnych rodzajów drgań kadłuba, napędu i wyposażenia, tak jak to precyzują wskazania 2.2 do 2.6, ale w konkretnym projekcie o potrzebie wykonywania danego tematu obliczeniowego decydować powinny oszacowania wstępne oraz informacje pomiarowe ze statków podobnych.

Kryteria liczbowe dla oceny dozwolonych amplitud drgań w etapie ich oszacowań prognozowych należy przyjmować nie wyższe niż to podaje tablica 3.4 i jej interpretacja w odniesieniu do kadłuba zawarta w 3.4.3..

2.1.2 PRS nie określa metod prognozowania zakładając, że są one w ciągłym rozwoju i że projektant jest w tym zorientowany. Zaleca się jednak, by programy używane do obliczeń zostały uznane przez PRS.

2.2 Prognoza drgań ogólnych kadłuba

2.2.1 Aby prognozę drgań ogólnych kadłuba statku uznać można za przybliżoną w stopniu wystarczającym, to analiza obliczeniowa na etapie projektowym powinna obejmować kolejno drgania:

- .1 pionowe giętne, przejawiające się jako ugięcia sprężyste kadłuba w jego płaszczyźnie symetrii;
- .2 poziome giętne, czyli gięcia sprężyste kadłuba w płaszczyźnie jego wodnicy pływania;
- .3 giętno-skrętne kadłuba, polegające na wzajemnych przemieszczeniach jego przekrojów poprzecznych wokół chwilowych środków ich obrotu (osi ścinania).

Obliczenia drgań wg .2 i .3 powinny być wykonane, jeżeli występuje zagrożenie rezonansami w drganiach pionowych giętnych. Dla typowych statków towarowych analizę wstępną tego zagrożenia zaleca się przeprowadzić wzorami przybliżonymi (patrz załącznik 4). Stosowanie tych wzorów należy ograniczyć do takich statków, dla których ze względu na ich oceny konstrukcyjne i parametry eksploatacyjne można wskazać co najmniej 3 jednostki podobne, w tym jedną dobrze rozpoznaną w wyniku przeprowadzenia kompletnych pomiarów drganiowych.

2.2.2 Analiza wstępna zagrożeń kadłuba rezonansami głównymi polega na wyznaczeniu częstotliwości własnych drgań giętnych pionowych dla form od 2-węzłowej do 4-węzłowej (lub wyższej, zależnie od potrzeb i oszacowań na podstawie danych ze statków podobnych) i następnie na porównaniu ich z częstotliwościami wymuszeń od:

- fali regularnej (częstość spotkaniowa - patrz załącznik 5),
- pędnika i linii wałów,
- silnika głównego.

Jeżeli porównanie to wskaże możliwość wystąpienia rezonansu w warunkach eksploatacyjnych, to wówczas należy powtórzyć obliczenia jedną z metod analitycznych (patrz załącznik 3) i zależnie od ich wyniku i oszacowań liczyć również drgania poziome giętne i skrętno-giętne kadłuba.

2.2.3 Dla statków o długości powyżej 150 m celowe jest stosowanie zaprogramowanych na EMC metod analitycznych także dla wstępnej oceny zagrożenia rezonansami głównymi, przede wszystkim z uwagi na potrzebę dokładniejszego wyznaczenia częstotliwości własnych dla form wyższych. Postępowanie takie jest również celowe, gdy napęd statku stanowi rzędowy silnik tłokowy o liczbie cylindrów do 6 włącznie.

2.2.4 Jeśli rozpoznane obliczeniami prognozowymi rezonanse, oceniane jako główne, znajdują się w przedziale 85 do 100% obrotów nominalnych układu napędowego, to zaleca się ich odsunięcie poza ten przedział poprzez zmianę częstości własnej lub wymuszającej. Gdy zmiany takie nie są możliwe, należy tak zwiększyć tłumienie wzbudzanego układu lub tak zmniejszyć siłę wymuszającą, aby nie spowodowała ona drgań wyższych niż dopuszczalne. Odpowiednie obliczenia przedłożone PRS w etapie projektowym statku powinny znaleźć w takim przypadku potwierdzenie dodatkowe w pomiarach (patrz rozdział 3).

2.2.5 Wskazane jest obliczenie amplitud drgań wymuszonych pozarezonansowych belki kadłuba w przypadkach, gdy:

- wskazuje na to ocena sił w łożyskach pochwy wału śrubowego oraz sił powierzchniowych w obrębie rufy (siły powierzchniowe od ciśnień nad śrubą - patrz załącznik 6),
- stosunki wymiarowe kadłuba odbiegają znacząco od przeciętnych dla danego typu statku,
- statek jest nietypowy (nowatorski) ze względu na swoje cechy konstrukcyjne, prędkość, sposób załadowania i inne, to znaczy nie można wskazać trzech statków podobnych, z których co najmniej jeden byłby rozpoznany pomiarowo ze względu na drgania.

2.3 Prognoza wymuszeń pochodzących od śruby napędowej

2.3.1 Ważniejsze przyczyny powstawania wymuszeń dynamicznych w obrębie rufy są następujące:

- .1** niejednorodny rozkład prędkości w strumieniu dopływającym do kręgu roboczego śruby (zakłada się, że nawet we wczesnej fazie projektowania znajomość pola prędkości w kręgu śruby jest nieodzowna);
- .2** geometria rufy i okna śrubowego, czyli kształt (stosunki wymiarowe) kosa rufowego, tylnicy, steru i śruby;
- .3** niewłaściwe dopasowanie geometrii śruby do rozkładu pola prędkości za kadłubem statku (dobór liczby skrzydeł, typu profilów, pochylenie tworzącej, odchylenie linii środkowej skrzydła, promieniowy rozkład skoku, strzałki linii środkowej profilów itp.);
- .4** kawitacja pulsacyjna (niestacjonarna) na skrzydłach, wzmacniająca bardzo silnie składowe zmienne sił i momentów na śrubie.

Przyczyny wymienione w .1 do .4 uzasadniają potrzebę, aby we wczesnej fazie projektowania, gdy nie zostały jeszcze ustalone szczegóły geometrii śruby, ocenić możliwe skutki wyżej wymienionych przyczyn, stosując kryteria wstępne dla określenia:

- .1** dopuszczalnej wartości wymuszeń hydrodynamicznych działających na pozycie rufy nad śrubą (załącznik 6 i program „UNCA-04” w załączniku 3);
- .2** dopuszczalnej niejednorodności pola prędkości ze względu na kawitację skrzydła śruby (załącznik 7);
- .3** zmiennych sił generowanych na śrubie, a wymuszających drgania rufy poprzez łożyska wału śrubowego (załącznik 3, program „UNCA-04”).

2.3.2 Obliczenia składowych zmiennych sił i momentów na śrubie napędowej są szczególnie wskazane, gdy zachodzą (jednocześnie bądź oddzielnie) dwa następujące przypadki:

- .1** śruba jest nieoptymalna ze względu na średnicę lub liczbę obrotów;
- .2** pole prędkości dopływowej do śruby jest nadmiernie niejednorodne wg kryteriów podanych w załączniku 7.

Liczbowe propozycje kryteriów oceny zawarte w załącznikach 6 i 7 mogą być przez projektanta zastąpione innymi równoważnymi, co do których ma on uzasadnione racje; mogą też być określone dokładniej w późniejszej fazie projektu (np. programem „UNCA-04”).

2.4 Prediction of shafting vibration

2.4.1 Informacje o zagrożeniu drganiowym statku uzyskane wg 2.2 i 2.3 uzupełnić należy informacjami producentów instalowanych maszyn na temat generowanych przez nie wielkości wymuszeń drganiowych, sprawdzonych i zalecanych sposobów ich posadowienia oraz dopuszczalnych amplitud drgań w punktach charakterystycznych tych maszyn (więzy kinematyczne i statyczne).

W ogólnym przypadku prognoza dla układu napędowego może obejmować między innymi następujące drgania:

- .1 skrzydeł śruby napędowej;
- .2 skrotne linii wałów;
- .3 osiowe (wzdłużne) linii wałów;
- .4 giętne (poprzeczne) linii wałów;
- .5 fundamentów: silnika głównego, przekładni, łożyska oporowego, mechanizmu nastawczego śruby, itp. (patrz 2.6);
- .6 instalacji napędzanych i przyłączanych, jak np. prądnic wałowych, turbodmuchaw doładowujących, rurociągów spalinowych, parowych, wodnych i innych (patrz 2.5).

Zasady wykonywania obliczeń dotyczących drgań wymienionych w .2, a także ich oceny, uregulowane są osobno w ramach dokonywanej przez PRS oceny wytrzymałości linii wałów, co ujmują oddzielne wydawnictwa *{Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich, Część VI rozdz. 4}*.

2.5 Prognoza drgań maszyn pomocniczych i wyposażenia

2.5.1 Prognozę i wynikający z niej plan przedsięwzięć zapobiegających drganiom maszyn i urządzeń pomocniczych należy sporządzać w oparciu o dane uzyskane od ich producentów, a dotyczące zarówno wymuszeń generowanych przez te wyroby, jak i wskazanych dla nich optymalnych konstrukcji mocowań i posadowień.

W rozplanowaniu urządzeń i projektowaniu konstrukcji fundamentowych jednym z ważniejszych kryteriów jest uniknięcie znaczących drgań rezonansowych, które pojawić się mogą jako skutek wpływów układu napędowego, bądź lokalnych elementów konstrukcji kadłuba – patrz 2.6).

2.5.2 Zaleca się, aby prototypy instalowanych na statkach maszyn i urządzeń generujących drgania były uprzednio badane na fabrycznym stanowisku prób, a pełna informacja z tych prób dotycząca drgań (patrz także załącznik 1, poz. 7 do 15) była uwzględniona w odpowiedniej fazie projektowania. Jeśli maszyny i urządzenia przewidziane są do pracy na posadowieniu podatnym (elastycznym), to próby powinny odbyć się na takim właśnie posadowieniu (np. na ramie pośredniej), z tymi podkładkami i przyłączami podatnymi, które będą zastosowane w instalacji statkowej.

2.6 Prognoza drgań lokalnych kadłuba

2.6.1 Zapobieganie drganiom lokalnym o charakterze rezonansowym polega na obliczeniowym wyznaczeniu częstotliwości drgań własnych elementów płytowych i ramowych kadłuba (tzn. belek, ram, rusztów) i następnie na ewentualnym przesunięciu tych częstotliwości, poprzez zmiany konstrukcji poza pasmo spodziewanych częstości wymuszeń.

Niezbędne jest w tym celu wykonanie obliczeń drgań pierwszej formy dla tych elementów konstrukcji, na które wg oszacowań wstępnych oddziaływać będą usytuowane w pobliżu źródła wymuszeń (układ napędowy, silniki i maszyny pomocnicze):

W oszacowaniach takich zaleca się wziąć pod uwagę następujące, dające się miejscowo wyodrębnić elementy kadłuba:

- .1 w obrębie skrajnika rufowego: płyty poszycia zewnętrznego, grodzie, platformy, wiązania ramowe;
- .2 w obrębie maszyny głównej i pomocniczej: ruszt denny dla całego przedziału i oddzielnie płyty poszycia dna wewnętrznego i zewnętrznego, zwłaszcza wycinki w rejonach posadowienia maszyn tłokowych, grodzie, międzypokładki i platformy, a szczególnie te, na których posadowione będą maszyny tłokowe (np. sprężarki tłokowe na międzypokładzie);
- .3 w obrębie nadbudówki, pokładówki, masztówki itp. (jeżeli są one usytuowane na rufie, bądź narażone na oddziaływanie innych znaczących wymuszeń): płyty pokładów, ścian wzdłużnych i poprzecznych, maszty, komin i inne konstrukcje cechujące się znacznym oddaleniem ich mas od belki kadłuba;
- .4 bryła nadbudówki: zaleca się sporządzenie prognozy drganiowej zawsze, gdy nadbudówka usytuowana jest na rufie, a w innych jej położeniach tylko wtedy, gdy wskazują na to dane ze statków podobnych, bądź oszacowania wstępne; prognozę należy sporządzić także zawsze, gdy połączenie nadbudówki z belką kadłuba jest elastyczne (poprzez podkładki lub inne elementy o podatności dobranej wg obliczeń).

2.6.2 Stosownie do 2.1.2 wzory i metody obliczeniowe dla drgań projektant wybiera według swego najlepszego rozeznania. Informacje o programach, które mogą być użyte dla celów wymienionych w 2.6.1 zawiera załącznik 3.

3 POMIARY I KRYTERIA OCENY DRGAŃ

3.1 Zakres pomiarów

3.1.1 Stosownie do treści 1.2.2 zaleca się wykonywanie pomiarów drgań na wszystkich statkach w budowie (tzw. statkach nowych), przed przekazaniem ich do eksploatacji, z tym że programy takich pomiarów powinny być zróżnicowane na następująco:

- .1 dla prototypów serii – according to 3.2.1 and 3.2.2
- .2 dla statków seryjnych – according to 3.2.3.

3.1.2 Prototypem serii, z punktu widzenia drgań, jest także statek seryjny, na którym wprowadzono takie zmiany w konstrukcji i wyposażeniu, że zmieniły się, bądź zmienić się mogły, własności masowo-sprężyste i w ślad za tym częstotliwościowe charakterystyki odzewowe kadłuba. Także zmiana samych źródeł wymuszeń, bądź tylko ich usytuowania czyni statek seryjny prototypowym pod względem drganiowym.

3.1.3 Pomiary drgań na statkach eksploatowanych wskazane są w przypadkach, gdy stan drgań staje się uciążliwy dla załogi, bądź gdy jest on najbardziej prawdopodobną przyczyną niesprawności działania niektórych urządzeń lub powoduje uszkodzenia zmęczeniowe konstrukcji.

3.1.4 Pomiary wykonywane dla celów nadzoru PRS powinny być w zasadzie przeprowadzone przez laboratorium uznane przez PRS. W uzgodnieniu z zainteresowanymi stronami pomiary powinny być wtedy wykonane w obecności inspektora PRS.

3.2 Program pomiarów

3.2.1 Dla prototypowych statków serii i dla statków nieseryjnych według 3.1.1 i 3.1.2 w komplecie podstawowej dokumentacji nadzorczo-wykonawczej, o której mowa w 1.2.2 zaleca się przedstawić PRS program pomiarów drgań, zawierający:

- .1 informacje o częstotliwościach drgań własnych, wyliczonych w myśl treści rozdziału 2, zestawione w przejrzystym układzie graficznym bądź tabelarycznym;
- .2 informacje o parametrach pracy mechanizmów i urządzeń i o częstotliwościach wymuszeń;
- .3 opis treści technicznej pomiarów oraz szczegółowy plan punktów pomiarowych w formie przejrzystych szkiców; w opisie treści należy podać, które wielkości z prognozy obliczeniowej będą mierzone, w tym przede wszystkim te, które uważa się za najmniej pewne, a także te, które prognoza pominęła np. z braku metod obliczeniowych;
- .4 opis procedury pomiaru i warunków ruchowo-obciążeniowych statku wymaganych tą procedurą zarówno dla prób na uwięzi, jak i w morzu;
- .5 informacje o przewidzianej do pomiarów aparaturze z podaniem jej pasma przenoszenia, charakterystyk czujników, zakresu dynamiki, sposobu kalibracji układów na statku, danych o wielkości błędów pomiarowych i innych informacji ważnych z punktu widzenia obróbki wyników i ich oceny.

3.2.2 W przypadku, gdy obliczenia prognozowe i próby zdawczo-odbiorcze nie mogą dostarczyć wszystkich informacji ważnych dla eksploatacji, bądź dla ulepszenia następnych statków serii, celowe jest rozszerzenie programu o badania i pomiary odpowiednie dla postawionego zadania, przykładowo:

- wyznaczanie częstości własnych drgań lokalnych poprzez badanie konstrukcji za pomocą wzbudnika;
- wyznaczanie parametrów drgań (– jeśli uznano je na próbach za zawyżone) w różnych warunkach załadowania i stanach morza, poprzez badania w jednym z pierwszych rejsów eksploatacyjnych statku.

3.2.3 Dla kolejnych statków serii, których prototypy przebadano w zakresie wynikającym z 3.2.1, zaleca się wykonywanie programu zawężonego, obejmującego pomiary wielkości, które ocenione były jako znaczące w analizie wyników z prototypu serii.

3.2.4 W przypadku, gdy PRS wymaga bezpośrednich pomiarów naprężeń w kadłubie zaleca się, aby program obejmował także wykonanie tych pomiarów w taki sposób, by możliwe było wy wartościowanie i analiza częstotliwościowa składowej zmiennej naprężeń pochodzących od drgań kadłuba.

3.3 Warunki na próbach

3.3.1 Dla badania drgań w układzie napędowym oraz drgań ogólnych i lokalnych kadłuba pomiary powinny być wykonane przy spełnieniu następujących warunków:

- stan morza poniżej 3;
- siła wiatru poniżej 4 stopni Beauforta;
- głębokość akwenu większa od pięciokrotnego zanurzenia średniego;
- stabilność kursowa mieszcząca się w wychyleniach steru poniżej 3° na burcie;
- stan i sposób załadowania: jeden z typowych opisanych w „Instrukcji załadowania” najbardziej wskazany jest ten, przy którym spodziewane drgania będą najwyższe.

Dla badań maszyn i urządzeń pomocniczych lub fragmentów konstrukcji warunki te nie muszą być spełnione w przypadkach, gdy stwierdzić można, że wymuszenia zewnętrzne nie zakłócają znacząco wielkości mierzonych lub gdy zakłócenia takie można wyodrębnić analitycznie.

3.3.2 Warunki obciążeniowe i ruchowe siłowni winny być takie, by źródła drgań (śruba, silniki i inne) nie generowały wymuszeń przypadkowych na skutek złego stanu technicznego, np. uszkodzone skrzydło śruby, niesprawne spalanie w jednym z cylindrów itp.).

3.3.3 Procedura pomiarów i badań zapewniać powinna, na ile to możliwe, najprostszą identyfikację źródeł drgań, zwłaszcza w punktach, gdzie wystąpiły nadmierne amplitudy. Oznacza to, że w rozpatrywanym punkcie wartości drgań należy mierzyć osobno, jako wywołane przez kolejno włączane i wyłączane źródła drgań.

3.3.4 Dla badań rezonansów, o których mowa w rozdziale 2, obroty śruby należy zmieniać krokami nie większymi niż co 2,5 obr./min. w zakresie prędkości „pół naprzód” do „cała naprzód”. Dla statków ze śrubą nastawną pracującą w sprzężeniu skok-obroty, moment-obroty, bądź innym, kolejne obciążenia należy zmieniać tak, aby wzrastały o wielkość nie większą niż 7% mocy pełnej.

3.3.5 Aby uniknąć nadmiernej ilości pomiarów i gromadzenia zbędnych informacji w sprawozdaniu, o którym mowa w 3.6, wartości drgań zmierzonych na elementach konstrukcji uważanych za sztywne (np. ławy fundamentowe, ramy silników i inne) zaleca się podawać jako wartości średnie z odczytów w kilku punktach pomiarowych, równomiernie rozmieszczonych.

Jeśli jednak, w którymkolwiek z punktów, wartość zmierzona przewyższa kryterialną, ilość tych punktów należy zageścić i wykonać pomiary tak, aby możliwe było poznanie formy drgań konstrukcji.

Przykładowo wartość drgań poprzecznych (w kierunku H) dla głowic silnika spalinowego można podać jako średnią z pomiarów w co najmniej trzech punktach, usytuowanych na końcach i w środku długości silnika, na wysokości jego komory spalania, ale tylko w przypadku, gdy żadna z głowic nie drga nadmiernie w świetle kryterium podanego w pozycji 10 tablicy 3.4.

3.3.6 Aparatura do pomiaru drgań powinna spełniać aktualne wymagania Polskich Norm (patrz załącznik 1) lub innych standardów krajowych lub międzynarodowych uznanych za równoważne.

Dla pomiarów i badań na pierwszych statkach serii zaleca się stosowanie zestawów pomiarowych umożliwiających rejestrację przebiegów drganiowych oraz ich analizę spektralną i fazową.

3.3.7 Zaleca się, aby pasmowe analizy widmowe drgań, jeśli ich sporządzanie jest potrzebne (patrz odsyłacz 3 do tablicy 3.4), obejmowały zawsze zakres między częstotliwościami określonymi następująco:

- d o l n ą g r a n i c z n ą f_d przyjmowaną jako niższą z dwu liczb:
- f_{\min} = najniższe stabilne obroty śruby napędowej o skrzydłach stałych, (Hz)
- f_{2n} = częstotliwość własna pierwszej, dwuwęzłowej formy drgań giętych pionowych kadłuba, (Hz)
- g ó r n ą g r a n i c z n ą, przyjmowaną jako nie niższą od najwyższych częstotliwości tych sił wymuszających, które oddziałują znacząco na badaną konstrukcję.

3.4 Kryteria i reguły ich stosowania

3.4.1 Tablica 3.4 podaje wartości kryterialne zalecane do stosowania w ocenie dopuszczalności drgań w normalnych warunkach eksploatacji. Obraz graficzny tej tablicy przedstawia rys. 3.4.

3.4.2 Kryteria dopuszczalności drgań mogą, w umowie między armatorem i stocznią, zostać ustalone odmiennie niż to podaje 3.4.1, jednakże ustalenie takie powinno być oparte na wiarygodnych badaniach własnych stoczni lub producenta maszyn i urządzeń lub też udokumentowane publikacjami normalizacyjnymi, bądź naukowymi.

W takich przypadkach szczegóły uzgodnień co do kryteriów oceny oraz ich uzasadnienie należy przedłożyć PRS.

Tabela 3.4

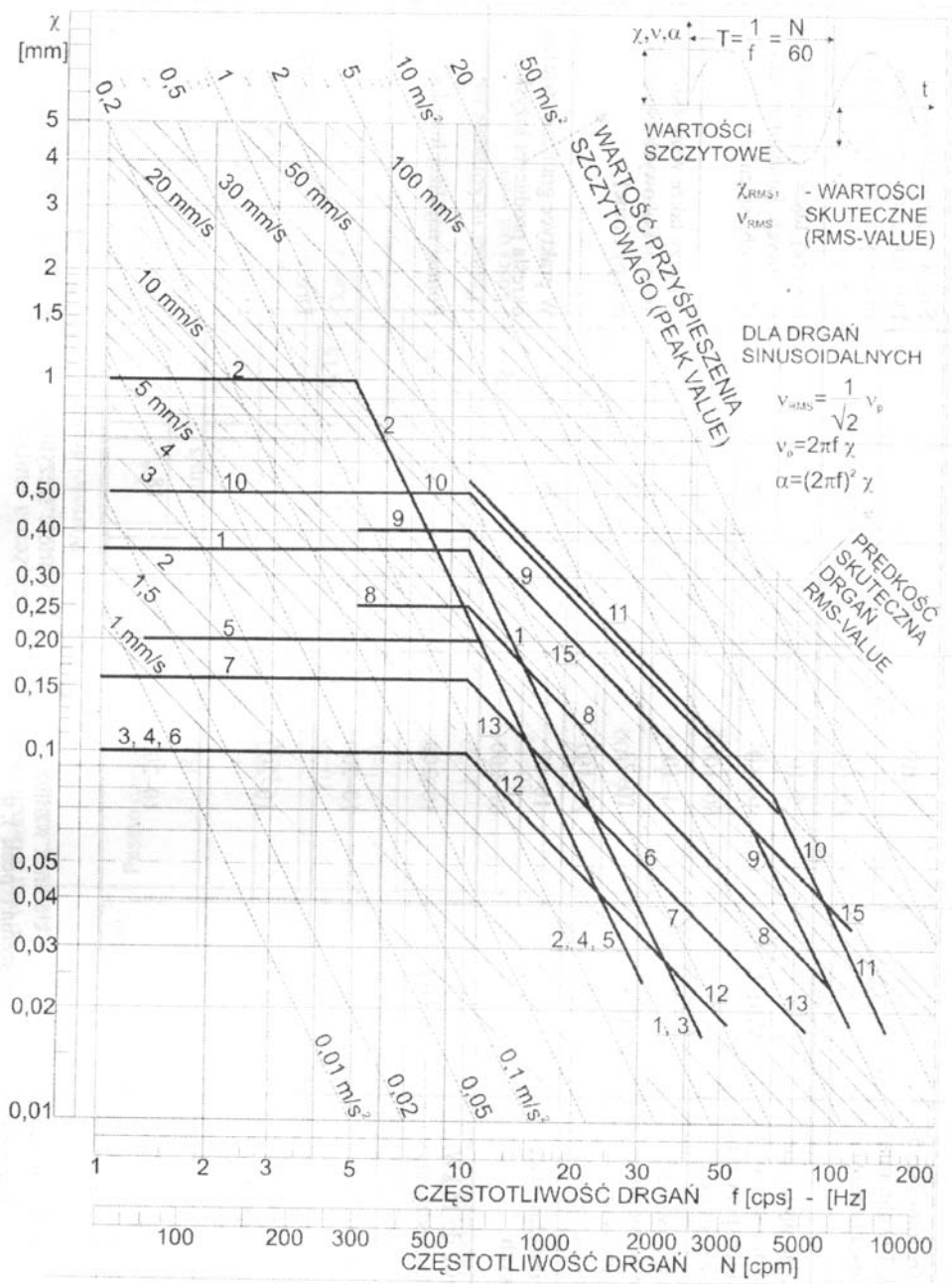
Zalecane wartości drgań dopuszczalnych w warunkach normalnego obciążenia marszowego, przy stanie morza do 3

Lp.	Nazwa konstrukcji, mechanizmu lub wyposażenia	Kierunek drgań	Pasma częstotliwości	Wartość drgań			Uwagi
				x_p	v_{sk}	a	
				Hz(cps)	mm	mm/s	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Wal śrubowy i wały pośrednie, pomiar na korpusach łożysk nośnych	V, H	1-10	0.35			Nie dot. tzw. wału podatnego: patrz objaśnienie 5. Dodać kierunek <i>L</i> dla łożysk tocznych
			10-50			0,15.	
2	ŁOŻYSKA OPOROWE: – dla napędu wolnobieżnego bez przekładni	L	1-5	1.0			Pomiar na korpusie na wysokości osi wału
			5-50			0.1	
3	– dla napędu z przekładnią jedno-stopniową	L	1-20	0.1			
			20-50			0.15	
4	– dla napędu z przekładnią dwu-stopniową	L	1-16	0.1			
			16-50			0.1	
5	Przekładnie napędu głównego korpus na wysokości ławy fundamentowej i łożysk	V, H	1-11.2	0.20			
			11.2-50			0.1	
6	Turbiny główne – pomiar na ławie fundamentowej lub korpusach łożysk	V, H	1-16	0.1			
			16-100		7.1		
7	Silniki spalinowe wolnobieżne do 300 obr./min., pomiar na ławie fundamentowej	V, H	1-10	0.16			Szttywno posadowione
			10-100		7.1		

1	2		3	4	5	6	7	8
8	UKŁAD NAPĘ- DOWY STATKU	Silniki spalinowe średnio- i szybko- kobieźne, powyżej 300 obr./min.. pomiar na lawie fundamentowej	V, H	5-10	0.25			Sztynno posadowione. Dot. także innych ma- szyn tłokowych i wymienników ciepła
				10-100		11.2		
9	UKŁAD NAPĘ- DOWY STATKU	Silniki spalinowe, jak wyżej, ale posadowione podatnie lub na fun- damentach lekkich, pomiar na ramie fundamentowej silnika	V, H, L	5-10	0.4			Dotyczy także innych maszyn tłokowych. Fun- dament lekki (patrz objaśnienia 4).
				10-60		18		
				60-100			1.0	
10		Silniki spalinowe wszystkich ty- pów niezależnie od rodzaju posa- dowienia, drgania korpusu mierzo- ne na wysokości głowic	H, L	1-10	0.5			Dotyczy także wszystkich maszyn tłokowych (sprężarki, pompy i inne)
				10-73		23		
				73-150			1,5	
11		Turbodmuchawy doładowujące silników spalinowych	V, H, L	10-67		25		W praktyce graniczną wartość określa produ- cent łożysk
				67-100			1.5	
12		Maszyny wirnikowe do 15 kW, w tym także silniki elektryczne i prądnice	V, H, L	10-200		4.5		Pomiar najbliższej łożyska
13		Maszyny wirnikowe od 15 do 75 kW	V, H, L	10-200		7.1		Drgania zespołów prądotwórczych można oceniać wg projektu ISO- 8528 (patrz załącznik 1 poz. 18)
14		Maszyny wirnikowe powyżej 75 kW posadowione sztywno	V, H, L	10-200		11.2		
15		Maszyny wirnikowe powyżej 75 kW posadowione podatnie lub na fundamentach lekkich	V, H, L	10-200		18		j.w. fundament lekki patrz obj. 4

Oznaczenia:

V – kierunek pionowy, H – kierunek poprzeczny poziomy, L – kierunek wzdłużny poziomy, x_p – wartość szczytowa przemieszczenia ("peak"),
 V_{rms} – wartość skuteczna prędkości, [mm/s]; a – wartość szczytowa przyspieszenia ("peak"); g – 10 m/s²



Rys. 3.4
 Graficzny obraz zalecanych wartości drgań dopuszczalnych wg tablicy 3.4
 (numery krzywych wg pozycji tej tablicy)

Objaśnienia do tablicy 3.4

- .1 Dla drgań innych niż dające się opisać pojedynczą sinusoidą nie należy wzajemnie przeliczać amplitudy, przemieszczenia, prędkości, prędkości skutecznej i przyspieszenia,

- .2 Wartości kryterialne podane w tablicy 3.4 odnosić należy oddzielnie dla każdego z kierunków określonych w kolumnie 3 tej tablicy,
- .3 Wartości kryterialne obowiązują dla pasm częstotliwości podanych w kolumnie 4 tablicy 3.4. Jeśli zmierzona dla tego pasma (lub dla pasma szerszego, którego ze względu na konstrukcję przyrządu zmienić nie można), wartość liniowa przewyższa kryterialną, to zaleca się przeprowadzić analizę spektralną sygnału w pasmach tercjowych lub węższych i zidentyfikować częstotliwości dominujące.
- .4 Interpretacja określenia: „fundament lekki” stosowanego w treści Ip. 9 i 15 tablicy 3.4 powinna być następująca: w etapie projektowym za fundament lekki należy uważać taki, którego ciężar jest mniejszy od 1/4 ciężaru maszyny.
W etapie pomiarów za „lekki” należy uznać taki, w którym poziom drgań zmierzonych na jego ławie podczas pracy posadowionej na nim maszyn (przewyższa o co najmniej 4 dB ($\cdot 1.58$ razy) poziom zmierzony w tych samych kierunkach na najbliższych wiązaniach kadłuba z tą ławą fundamentową bezpośrednio nie związanych).
- .5 Dla łożysk podatnego wału śrubowego (wyłączonych uwagą w kolumnie 8. lp. 1 tablicy 3.4), zaleca się, aby ocenę ich zagrożenia drganiowego przedstawić PRS w oddzielnym opracowaniu, analizującym wszystkie zjawiska dynamiczne takiej linii wałów.

3.4.3 Kryteria dopuszczalności drgań mogą, w umowie między aramatorem i stoczną, zostać ustalone odmiennie niż to podaje 3.4.1, jednakże ustalenie takie powinno być oparte na wiarygodnych badaniach własnych stoczni lub producenta maszyn i urządzeń lub też udokumentowane publikacjami normalizacyjnymi, bądź naukowymi.

W takich przypadkach szczegóły uzgodnień co do kryteriów oceny oraz ich uzasadnienie należy przedłożyć PRS.

3.4.4 Tablica 3.4 nie podaje wartości kryterialnych odnoszących się bezpośrednio do kadłuba statku, rozpatrywanego jako belka lub też analizowanego jako suma jodzespółów konstrukcyjnych, takich jak m.in. dno podwójne, grodzie, nadbudówki, pokłady, część rufowa i inne. W kwestii tej należy kierować się:

- .1 wartościami granicznymi wynikającymi z konieczności stosowania przepisów i zaleceń zdrowotnych (patrz 1.1.4 oraz załącznik 2);
- .2 wartościami zadanymi pośrednio poprzez określenie poziomów drgań dopuszczalnych na ławach fundamentowych maszyn i urządzeń i na korpusach łożysk linii wałów;
- .3 wartościami wynikającymi z dopuszczalnych naprężeń zmęczeniowych w drgających elementach konstrukcyjnych belki kadłuba: w przypadku braku danych liczbowych co do tych naprężeń, zaleca się nie przekraczać pola wyznaczonego na rys. 3.4 prostymi:

$$x = 1 \text{ mm}, v_{\text{rms}} = 25 \text{ mm/s}, a = 15 \text{ m/s}^2.$$

3.4.5 Drgania o częstotliwościach do 100 Hz nie dające się zidentyfikować z żądą pozycją tablicy 3.4 zaleca się oceniać wg przyjętej dla danego miejsca wielkości dopuszczalnego hałasu (patrz załącznik 2, rys. Z 2-4) lub wg kryterium każdorazowo uzgodnionego z PRS.

Kryteria dla maszyn, ujęte w pozycjach od 5 do 15 tablicy 3.4 mogą być przyjmowane za wiążące także dla oceny drgań miejscowych przyrządów pomiarowych i wskaźników zamontowanych na tych maszynach (np. manometry, termometry itp.) z tym, że zaleca się przyjmować ostrzejsze (choć liczbowo nie ujęte) kryterium poprawnego odczytu wskazań takiego przyrządu. Z kryterium tego wynikać może potrzeba zmiany miejsca lub sposobu zamontowania przyrządu.

3.5 Ocena wyników i wnioski z pomiarów

3.5.1 Jeżeli pomiary z prototypu serii wskazują, że poziomy drgań przekraczają zalecane kryteria, należy dla następnego statku serii powtórzyć procedurę zapobiegania określoną w rozdziale 2, ale już w wersji rozszerzonej o wynikający z oceny drgań zakres $t^{3,3 \cdot 10^{26}} P^m \& \wedge^{ozow} y^c \wedge l$ ulepszeń konstrukcyjnych. Rozszerzenie to należy uzgodnić z PRS w tych przypadkach, gdy zgodnie z 1.1 i 1.2 zagadnienia te objęte są nadzorem.

3.5.2 Jeżeli dla prototypu serii różnice częstotliwości rezonansowych prognozowanych i pomierzonych na próbach wynosiły więcej niż 10%, zaleca się ponowienie (w całości lub w odpowiednim fragmencie) analizy zagrożenia rezonansami na tym prototypie w warunkach jego normalnej eksploatacji i przedłożenie wyników tej analizy PRS jeszcze przed przekazaniem do eksploatacji następnych statków tej serii.

3.5.3 Jeżeli w warunkach typowych obciążeń eksploatacyjnych wartości drgań belki kadłuba lub ważnych podzespołów konstrukcyjnych (rufa, linia wałów, nadbudówka, i inne) przekraczają wartości podane w tablicy 3.4 lub też ocenione są jako uciążliwe dla ludzi (w myśl 1.1.4) – a jednocześnie trudne lub niemożliwe do usunięcia lub obniżenia środkami konstrukcyjnymi – to należy ustalić zakresy obrotów zabronionych dla pracy ciągłej wg 2.2.4 lub wg takiej samej reguły, jaką stosuje się dla drgań skrętnych (cz. VI rozdz. 4 *Przepisów klasyfikacji i budowy statków morskich*).

3.5.4 W ocenie drgań biernych maszyn zaleca się stosować następujące reguły:

drżania bierne, przekraczające 1/3 poziomu drgań czynnych zmierzonych

- .1 w tym samym punkcie maszyny, powinny być zmniejszone przez polepszenie konstrukcji posadowienia, bądź poprzez zmniejszenie wymuszeń w źródle wzbudzającym;
- .2 przekroczenie wartości kryterialnej (podanej w tablicy 3.4 lub ustalonej wg 3.4.2 i 3.4.3), z przyczyn m.in. drgań biernych, wymaga odrębnego rozpatrzenia dopuszczenia danej maszyny do ruchu.

W obu powyższych przypadkach celowe są szczegółowe badania diagnostyczne przyczyn zawyżonych drgań biernych maszyn.

Dla urządzeń biernych (nie generujących drgań), takich jak wymienniki ciepła, instalacje rurowe, elektryczne, sterujące, pomiarowe i inne nie wymienione w tablicy 3.4, drżania oceniać należy jako obciążenia zmęczeniowe mogące zagrozić układowi ruchowemu statku i bezpieczeństwu żeglugi.

3.6 Sprawozdania z pomiarów

3.6.1 Przed przekazaniem statku do eksploatacji należy przedłożyć PRS sprawozdanie zawierające przejrzyste uporządkowany komplet wyników i ich ocenę w świetle wykonanej prognozy i przyjętych kryteriów. Sprawozdanie to powinno być dokładną (lub w uzasadnionych przypadkach rozszerzoną) realizacją uzgodnionego uprzednio programu wg 3.2.

3.6.2 W tych przypadkach, gdy w czasie budowy statku lub po pierwszych próbach przeprowadzono zmiany i ulepszenia konstrukcji zmierzające do obniżenia drgań, w sprawozdaniu należy umieścić rysunki informujące o tym oraz dane liczbowe o stwierdzonych pomiarowo efektach zmian.

3.6.3 Zaleca się, aby przedkładane PRS sprawozdanie z pomiarów na kolejnym statku serii zawierało oprócz wyników i ich oceny także porównania z analogicznymi wynikami na prototypie i poprzednich statkach serii.

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH PUBLIKACJI NORMALIZACYJNYCH

1. PN-92/W-01352 Drgania na statkach. Metodyka pomiarów i rejestracji danych.
(idt¹ ISO 4867-1984: Code for the measurement and reporting of shipboard vibration data).
2. PN-92/W-01353 Drgania miejscowe konstrukcji statku i wyposażenia okrętowego. Metodyka pomiarów i rejestracji danych.
(idt ISO 4868-1984: Code for the measurement and reporting of local vibration data of ship structure and equipment).
3. PN-82/N-01350 Drgania. Terminologia.
(idt ISO-2041-1975: Vibration and Shock-Vocabulary).
4. PN-92/N-01351 Drgania mechaniczne i wstrząsy. Wytyczne do ogólnej oceny drgań na statkach handlowych.
(idt ISO-6954-1984: Mechanical vibration and shock-Guidelines for the overall evaluation of vibration in merchant ships).
5. PN-82/N-01351 Drgania. Podstawowe symbole i jednostki.
consistent with ISO-2041: Vibration. Basic symbols and units.
6. PN-91/N-01352 Zasady wykonywania pomiarów na stanowiskach pracy.
Vibration. Rules of making measurements at work places (consistent with ISO-2631/-1985).
7. PN-ISO 8579-2 : 1996 Przepisy odbioru przekładni zębatych. Określenie drgań mechanicznych przekładni zębatych podczas badań odbiorczych.
(idt ISO 8579-2 : 1993 Acceptance code for gears. Part 2. Determination of mechanical vibrations of gear units during acceptance testing).

¹ idt = identical with; = norma identyczna z ...

8. PN-ISO 10816-1 : 1998 Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyn na podstawie pomiarów na częściach niewrotujących. Wytyczne ogólne.
(idt ISO 10816-1 : 1995 Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 1: General guidelines).
9. PN-90/N-01357 Drgania. Metody pomiarów i oceny drgań maszyn pod względem bezpieczeństwa i higieny pracy.
Vibration. Measuring methods and evaluation of vibration from machinery with regard to safety and occupational hygiene.
10. PN-90/N-01358 Drgania. Metody pomiarów i oceny drgań maszyn.
(eqv¹ ISO 2372 : 1974 Vibration. Measuring methods and evaluation of vibration of machines).
11. PN-76/M-43121 Wentylatory. Metody pomiaru drgań.
Fans. Vibration measurement methods, (consistent with ISO-2372-1974).
12. PN-EN 1299 : 2002 Drgania mechaniczne i wstrząsy. Wibroizolacja maszyn. Informacje dotyczące stosowania izolacji źródła.
(idt EN 1299 : 1997 Mechanical vibration and shock. Vibration isolation of machines. Information for the application of source isolation).
13. PN-EN 12096 : 2002 Drgania mechaniczne. Deklarowanie i weryfikowanie wartości emisji drgań.
(idt EN 12096 : 1997 Mechanical vibration. Declaration and verification of vibration emission values).
14. PN-IEC 34-14 : 1998 Maszyny elektryczne wirujące. Drgania mechaniczne określonych maszyn o wzniosach osi wału 56 mm i większych. Pomiar, ocena i wartości graniczne drgań.
(idt EN 60034-14 : 1996 idt ISO 60034-14 1996, Cor. PN-IEC 34-14 : 1998/App. 1 : 2000. Rotating electrical machines. Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher. Measurement evaluation and limits of vibration).

¹ eqv = equivalent to „, = równoważna z normą (tzn. są różnice jedynie redakcyjne).

15. PN-ISO 7919-1 : 2000 Drgania mechaniczne maszyn z wyłączeniem maszyn tłokowych. Pomiary drgań wałów wirujących i kryteria oceny. Część 1: Wytyczne ogólne. (idt ISO 7919-1-14 : 1996 Mechanical vibration of non-reciprocating machines. Measurement of rotating shafts and evaluation criteria. Part 1: General guidelines).
16. PN-ISO 2923 : 2001 Akustyka. Pomiary hałasu na statkach. (idt ISO 2923 : 1996 + Cor. 1 : 1997, Measurement of noise on board vessels).
17. PN-W-01350-2 : 1996 Ochrona przed hałasem na statkach morskich. Warunki i metody pomiaru hałasu. Protection against noise on board sea-going ships. Sound level measurement conditions and measuring methods (consistent with IMO Resolution A.468 (XII) and ISO-2923 : 1966)
18. PN-ISO 8528-5 : 1997 Zespoły prądotwórcze prądu przemiennego napędzane silnikiem spalinowym tłokowym. Zespoły prądotwórcze. (idt Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets – Part 5. Generating sets).

KRYTERIA ZDROWOTNE OCENY DRGAŃ

Wszystkie wartości kryterialne, „zdrowotne” dotyczą – jak dotąd – punktu transmisji energii drgań, to znaczy styku przedmiotu drgającego z ciałem ludzkim.

Skutki oddziaływania drgań na organizm człowieka zależą od:

- amplitudy (intensywności, natężenia) i częstotliwości tych drgań;
- ich kierunku i czasu trwania (efekt kumulacji);
- wrażliwości osobniczej i wieku.

Najczęściej wyróżnia się następujące objawy chorobowe:

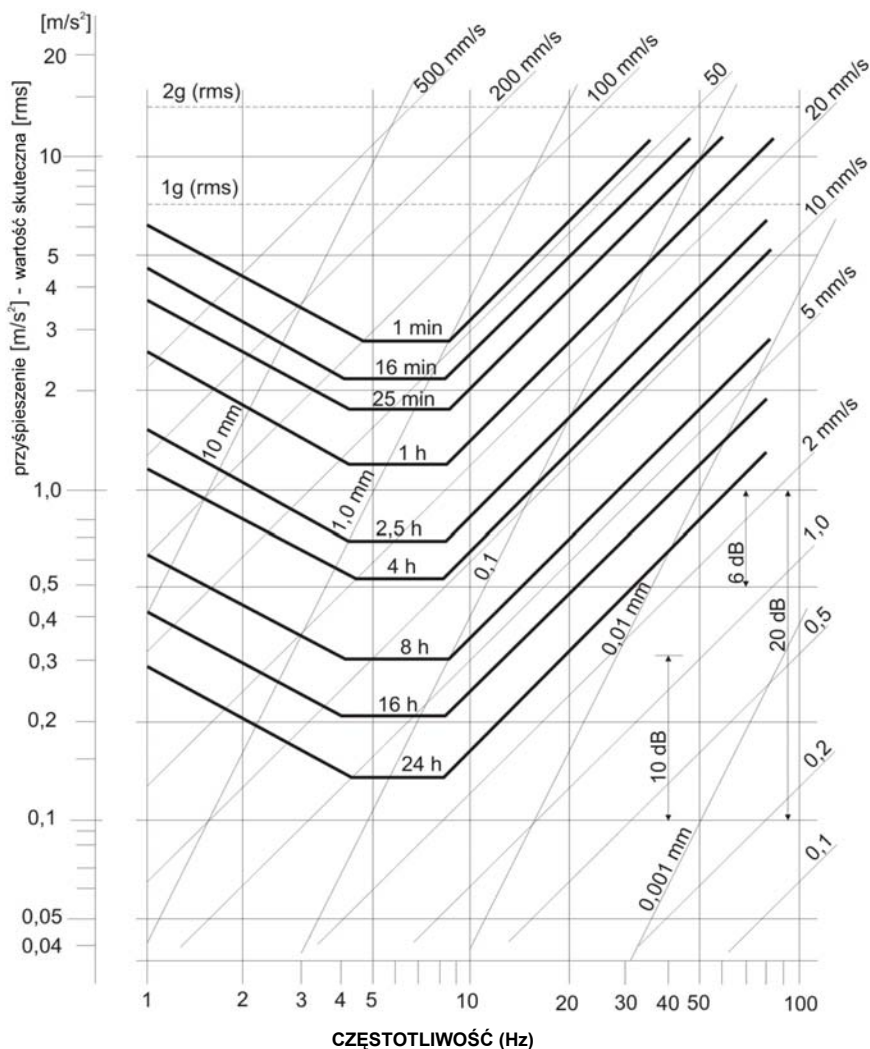
- psychofizyczne: zmęczenie, depresja, poczucie lęku, nerwowość, niezdolność, niechęć do pracy;
- fizjologiczne: uczucie duszności, zmiany ciśnienia, zmiany aktywności gruczołów wydzielania wewnętrznego, hemoliza, bóle brzucha i klatki piersiowej, podrażnienia nerek i szpiku kostnego itp.

Do ważnych cech dynamicznych ciała ludzkiego należy podatność na drgania rezonansowe.

Częstotliwości niebezpieczne dla poszczególnych organów zawierają się w przedziałach:

- | | |
|--|--------------|
| – głowa (drgania względem korpusu i zanik ostrości widzenia) | 20 – 30 Hz |
| – kręgosłup (drgania giętne) | 4 – 14 Hz |
| – wnętrzości brzuszne | 3 – 6 Hz |
| – gałki oczne (rezonans) | 60 – 90 Hz |
| – stawy i golenie nóg | 50 – 70 Hz |
| – szczęka dolna | 100 – 200 Hz |

Załączone tu wykresy rys. Z 2-1 do Z 2-5 informują o kryteriach, jakie współczesna wiedza oferuje dla oceny narażeń na drgania. Kryteria te nie są jednoznacznie zgodne między sobą i pozostawiają dość duże marginesy dla subiektywnej oceny przez zainteresowanych. Cytowane na rys. Z 2-3 zalecenia ISO dla statków (patrz zał. I, poz. 4 i 6) stosowane są tylko dla orientacyjnego szacowania stopnia komfortu w kategoriach: skargi załóg mocne, umiarkowane bądź rzadkie, ale mogą być także przywoływane w kontraktach jako kryterium sanitarne dla drgań belki kadłuba i bryły nadbudówki w rejonie stałego przebywania ludzi. Służy ono tym samym za miernik skuteczności antywibracyjnej środków zaradczych zastosowanych w konstrukcji kadłuba, nadbudówki, niektórych maszyn itp.



Rys. Z 2-1

Drgania oddziałujące wzdłuż ciała człowieka stojącego lub siedzącego w zależności od ich częstotliwości i czasu ekspozycji.

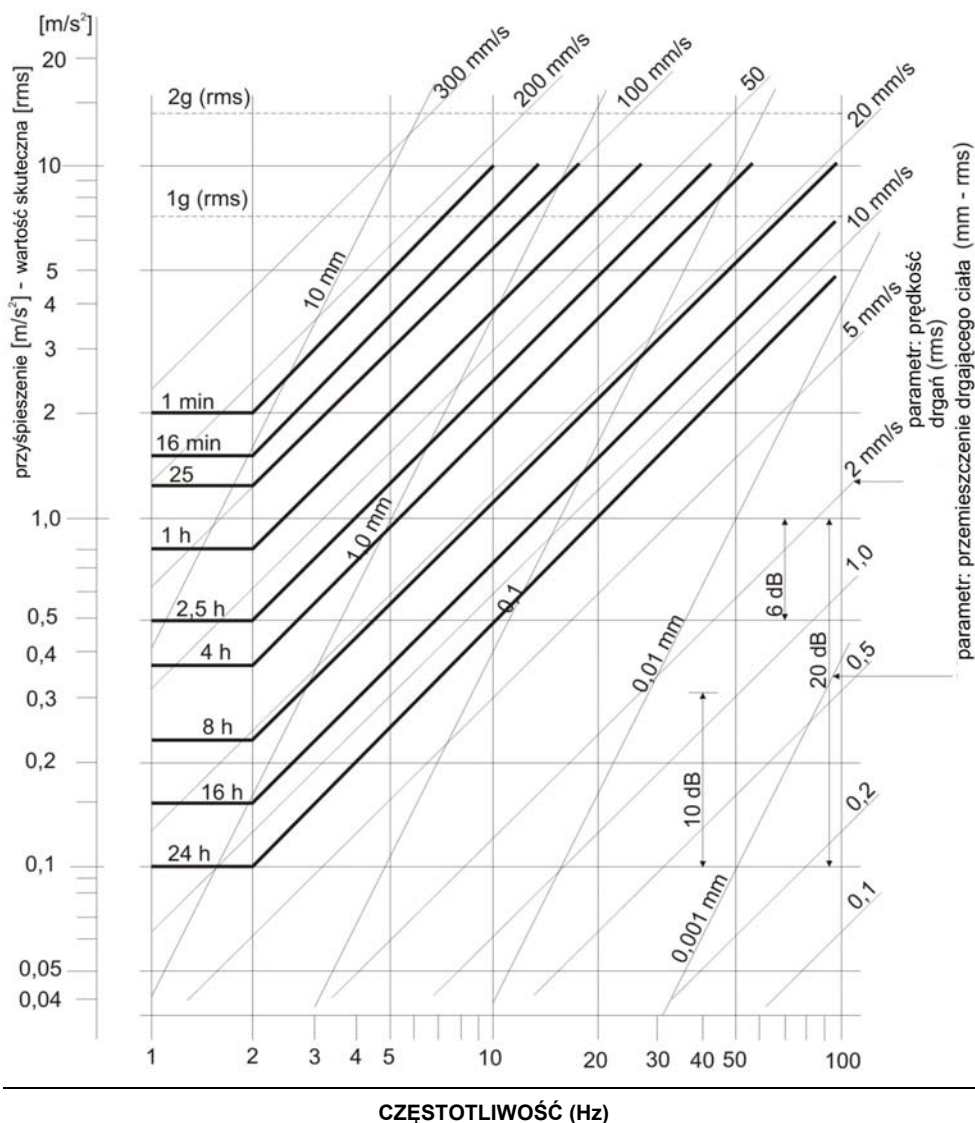
Krzywe wyznaczają granicę obniżonej sprawności w wykonywaniu pracy wymagającej stałej uwagi (np. kierowanie pojazdem).

Przekroczenie czasu ekspozycji wskazanego na krzywej spowoduje wzrost ryzyka złego wykonania czynności.

Podwojenie pokazanych poziomów (czyli podwyższenie o 6 dB) oznacza granicę ekspozycji bezpiecznej dla zdrowia, której przekroczenie wymaga uzasadnienia i szczególnych środków ostrożności.

Wartość obniżona o 10 dB, czyli 1/3 poziomów pokazanych, wyznacza granicę obniżonego samopoczucia, powyżej której utrudnione są takie czynności jak jedzenie, czytanie, pisanie.

(cytowane wg ISO – 2631 – 1985)



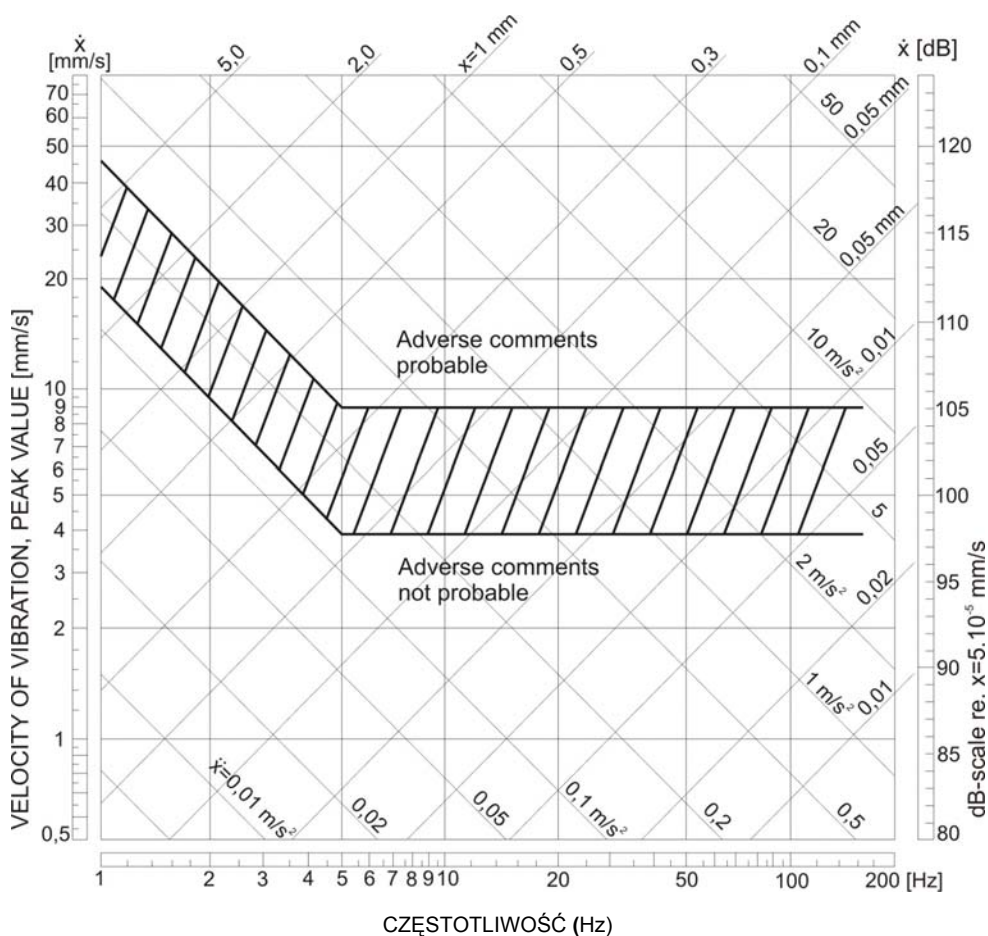
Rys. Z 2-2

Granica obniżonej sprawności jak dla rys. Z 2-1. ale dla drgań poprzecznych, tzn. prostopadłych do osi wzdłużnej ciała, oddziałujących na człowieka stojącego lub siedzącego

Dla drgań o widmie nieciągłym (sinusoida lub odosobnione składowe dyskretne) ocena polega na porównaniu z rzędną dla danej częstotliwości. Dla drgań w pasmach wąskich, do 1/3 oktawy, ocena polega na porównaniu z rzędną dla środkowej częstotliwości rozpatrywanego pasma.

Drgania szerokopasmowe ocenia się, porównując ich widma tercjowe z rzędnymi dla środkowych częstotliwości tercji, odczytanymi z krzywych pokazanych na rys. Z 2-1 i Z 2-2.

(cytowane wg ISO – 2631)



Rys. Z 2-3

Norma międzynarodowa pt. Drgania i wstrząsy mechaniczne – Wskazania dla oceny ogólnej drgań na statkach handlowych (ISO-6954 wyd. 1984-12-IS)

Obszar zacieniowany wyznacza wartości prędkości szczytowej w punkcie transmisji energii, przy których wystąpią sporadyczne skargi załogi. Powyżej tego obszaru skargi będą częste, poniżej raczej nie wystąpią.

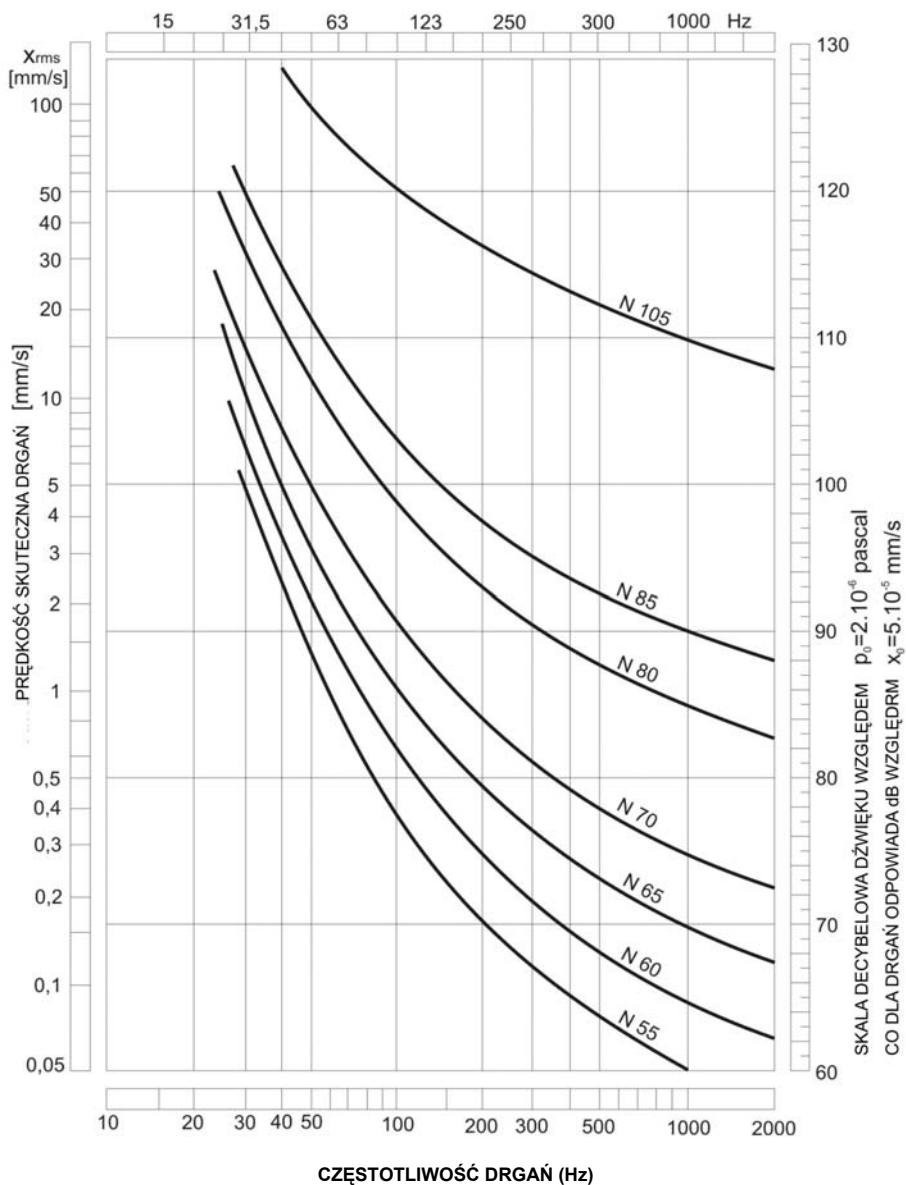
Ocena stopnia komfortu mieszkaniowego lub w ogóle stopnia narażenia organizmu ludzkiego w środowisku wibracyjnym jest możliwa tylko po wykonaniu pomiarów ściśle wg metodyki, opisaney w ISO-263 I.

Kryteria na rysunku jw. odnoszą się do każdego z kierunków (wzdłużny, poprzeczny, pionowy – na statku) oddzielnie i w zasadzie tylko do wyników zmierzonych w jednostkach prędkości szczytowej w przedziałach tercyjnych lub węższych.

Jeśli zastosowany miernik mierzył np. prędkość skuteczną, to ocena może nastąpić po przemnożeniu przez współczynnik szczytu F_c , charakterystyczny dla danego układu pomierzanego i mierzącego:

$$V_{peak} = F_c \sqrt{2} V_{rms}$$

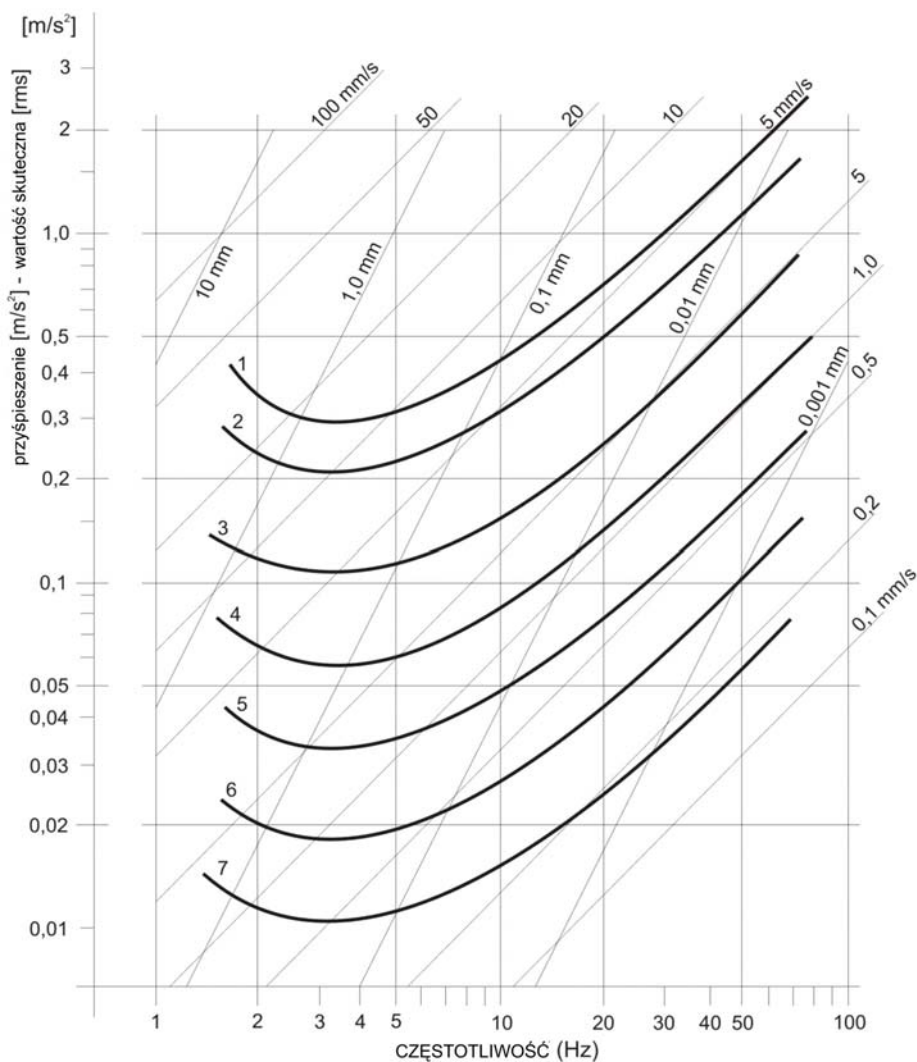
Dla statków F_c może wynosić od 1,0 dla czystej sinusoidy do $F_c = 1,8$ dla warunków najczęściej spotykanych na statkach handlowych. Poprawne i ściślejsze określenie F_c może być osiągnięte tylko poprzez pomiar.



Rys. Z 2-4

Krzywe oceny hałasu A' w pasmach częstotliwości niskich i średnich jako możliwe do stosowania kryteria oceny drgań.

Krzywe N wrysowane dla warunku analizy w pasmach tercjowych. Nr krzywej zwiększony o 5 informuje o natężeniach hałasu (dBA) generowanego przez drgania.



Rys. Z 2-5

Sanitarne normy drgań dla statków morskich, rzecznych i jeziorowych. (Min. Ochrony Zdrowia b. ZSRR. norma No 1103-73. brak informacji o dalszym obowiązywaniu tej normy.

- 1 – Obsługa bezwachtowa siłowni zautomatyzowanych, czas ekspozycji do 60 min. na dobę
- 2 – Siłownie ze stanowiskami sterowanymi nadzorowanymi okresowo i wachtą okresową – do 120 min. na dobę
- 3 – Dla wachty stałej w CMK i dla stanowisk typu przemysłowego (np. na statkach rybackich)
- 4 – Pomieszczenia służbowe oraz kabiny na statkach wykonujących podróże do 8 godz. w jednym przelocie
- 5 – Kabiny na statkach morskich III kategorii, odbywających podróże nie dłuższe niż 24 godz. w jednym przelocie.
- 6 – Kabiny na statkach morskich I i II kategorii, odbywających podróże dłuższe niż 24 godz. w jednym przelocie.
- 7 – Pomieszczenia medyczne (szpitaliki okrętowe).

**INFORMACJA
O NIEKTÓRYCH PROGRAMACH OBLICZENIOWYCH Z ZAKRESU
DRGAŃ KONSTRUKCJI OKRĘTOWYCH**

Programy mogą być realizowane w Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku

Dane aktualne wg stanu na marzec 2004 r.

UNCA 04

OPIS PROGRAMU DO ANALIZY PRACY ŚRUBY W NIEJEDNORODNYM POLU PRĘDKOŚCI

Nazwa Programu: UNCA 04

Platforma: PC/W9x/W2000

Algorytm: Część obliczeniowa programu oparta jest na modelu teoretycznym odkształcalnej powierzchni nośnej, która zmienia swoją geometrię w rejonie skrzydła pokrytego kawitacją laminarną. Powierzchnie nośne modelujące skrzydła śruby są zbudowane z dyskretnych elementów wirowych odzwierciedlających zmienność w czasie obciążeń hydrodynamicznych oraz dyskretnych źródeł i upustów odzwierciedlających grubość skrzydła. Natężenia osobliwości hydromechanicznych tworzących powierzchnię nośną są wyznaczone w oparciu o kinematyczny warunek brzegowy na powierzchni. Elementy wirowe rozmieszczone na skrzydle są uzupełnione układem wirów swobodnych rozmieszczonych na powierzchniach śrubowych rozpościerających się za śrubą. Na powierzchniach tych wydzielono dwie zmienne strefy. W jednej z nich elementy wirowe są zależne od czasu, w drugiej natomiast są stałe i odpowiadają obwodowo uśrednionemu polu prędkości. Kawitacja laminarną i kawitacja wirowa modelowane są za pomocą dodatkowych, zmiennych w czasie układów źródeł i upustów. Natężenia tych źródeł i upustów są wyznaczone na podstawie kinematycznego warunku brzegowego na powierzchni pęcherza kawitacyjnego. Pole ciśnienia na powierzchni nośnej wyznaczone jest przy wykorzystaniu równania Bernoulliego dla przepływów niestacjonarnych. To samo równanie wykorzystywane jest przy wyznaczeniu fluktuacji ciśnienia generowanych przez kawitującą śrubę w jej otoczeniu.

Zakres zastosowania: Program jest wykorzystywany do analizy pracy śrub okrętowych o znanej geometrii w zadanym trójwymiarowym polu prędkości. Obliczenia można przeprowadzać dla jedno- i dwuśrubowych układów napędowych. Program umożliwia obliczenie sił generowanych na skrzydłach i na wale, rozkładu ciśnienia na skrzydle, przebiegu zjawisk kawitacyjnych oraz fluktuacji ciśnienia w otoczeniu śruby.

Dane wejściowe: Następujące informacje służą jako dane wejściowe do programu

- szczegółowy opis geometrii skrzydła śruby (promieniowy rozkład skoku, długości cięciwy, skosu itd.),
- geometria profili poszczególnych przekrojów skrzydła,
- zestaw położenia kątowych śruby,
- opis pola prędkości, w którym pracuje śruba w postaci współczynników v/v_{ship} , osobno dla składowych osiowej, stycznej i promieniowej,
- współrzędne punktów, w których wyznacza się fluktuacje ciśnienia.

Wyniki: Program dostarcza następujących wyników:

- zmiennego w czasie rozkładu ciśnienia na powierzchni skrzydeł śruby,
- zmiennych w czasie sił hydrodynamicznych działających na skrzydło śruby,
- zmiennych w czasie sił hydrodynamicznych działających na wał śruby,
- obrazu niestacjonarnych form kawitacji na skrzydłach śruby w szczególności:
 - kawitacji **laminarnej**,
 - kawitacji wirowej,
 - kawitacji pęcherzykowej,
 - impulsów ciśnienia generowanych przez kawitującą śrubę w wybranych punktach w otoczeniu śruby, w szczególności na powierzchni kadłuba.

NIEKTÓRE PROGRAMY DLA OBLICZEŃ DRGAŃ KONSTRUKCJI OKRĘTOWYCH

Nastran/Patran - liniowa i nieliniowa, statyczna i dynamiczna analiza konstrukcji

Program wraz z pre- i postprocesorem przeznaczony jest do analiz złożonych konstrukcji mechanicznych. Jest on oparty na metodzie elementów skończonych, posiada wszystkie podstawowe typy elementów od 0-D do 3-D. W ramach programu można wykonywać analizy statyczne, obliczenia dynamiczne (metoda modalna i całkowanie bezpośrednie), analizy termiczne, obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej oraz problemy kontaktowe. Analiza dużych problemów może być wspomagana przez restarty, superelementy oraz metodę global-local. W wyniku uzyskujemy: siły wewnętrzne, reakcje, naprężenia, deformacje, amplitudy i fazy drgań własnych i wymuszonych.

Program może być wykorzystywany do obliczeń wytrzymałości ogólnej i lokalnej konstrukcji okrętowych oraz do analiz drgań własnych i wymuszonych kadłuba i nadbudówki statku z uwzględnieniem wody towarzyszącej.

MAESTRO - analiza wytrzymałości i dynamiki, optymalizacja kosztowa lub ciężarowa konstrukcji kadłuba okrętu

Program oparty na metodzie elementów skończonych, wyposażony jest w wyspecjalizowany pre- i postprocesor dostosowany do obliczeń konstrukcji okrętowych.

Program jest wykorzystywany głównie do szybkich analiz wytrzymałości ogólnej statku. Posiada wbudowane szereg procedur (np. samozrównoważenie modelu) przeznaczonych dla okrętownictwa, pozwalających na przyspieszenie analiz. Program umożliwia szybką ocenę wytrzymałości konstrukcji kadłuba w oparciu o wymagania instytucji klasyfikacyjnych dzięki zastosowaniu parametrów oceny. Moduł do analizy wytrzymałości granicznej metodą Adamchak'a umożliwia wyznaczenie momentu granicznego dla kadłuba statku. Program jest wyposażony w interfejs pozwalający na szybką transmisję danych do programu Nastran.

Program MAESTRO umożliwia również przeprowadzenie optymalizacji kosztowej, ciężarowej oraz położenia środka ciężkości kadłuba statku.

LWAL – obliczenia ułożenia linii wałów

Program przeznaczony do analiz ułożenia **linii** wałów z uwzględnieniem sztywnościowo-tłumieniowych charakterystyk warunków brzegowych (łożysk poprzecznych i kadłuba statku). W programie wbudowane są procedury pozwalające modelować film oleju smarowego łożysk poprzecznych (głównie łożysko rufowe) jako podparcie ciągłe. Program jest oparty na metodzie elementów skończonych (linia wałów) oraz metodzie różnic skończonych (charakterystyki łożysk). Program pozwala na półautomatyczną optymalizację ułożenia linii wałów. W wyniku analiz uzyskuje się reakcję łożysk, siły tnące i momenty gnące w linii wałów, naprężenia giętne i tnące oraz linię ugięcia osi wałów.

DTOR – obliczenia drgań skrętnych układu napędowego

Program przeznaczony do analiz drgań skrętnych, prostych i złożonych układów przeniesienia mocy. Procedury zostały napisane w oparciu o *Metodę elementów skończonych*. Program wyznacza składowe harmoniczne gazowych i masowych, stycznych sił wymuszających. Istnieje możliwość zadawania tłumień cylindrowych oraz sztywności sprzęgieł elastycznych w funkcji częstotliwości drgań. W wyniku obliczeń uzyskuje się częstotliwości i postacie drgań własnych oraz naprężenia i amplitudy drgań wymuszonych w funkcji prędkości obrotowej silnika. Program może służyć do rekalkulacji badań pomiarowych.

DSLW – obliczenia sprzężonych drgań wzdłużnych układu przeniesienia mocy

Program przeznaczony do analiz drgań wzdłużnych układu napędowego wymuszonych przez poosiowe siły hydrodynamiczne oraz przez sprzężenia giętno-skrętne-wzdłużne wału korbowego i sprzężenia skrętno-wzdłużne na śrubie napędowej. Program został napisany w oparciu o *Metodę elementów skończonych*. W celu uwzględnienia sprzężeń poprzez wał korbowy, w programie są wyznaczone składowe harmoniczne gazowych i masowych stycznych oraz promieniowych sił wymuszających, a następnie wyznaczane są amplitudy drgań skrętnych układu. Program obejmuje procedury do wyznaczania charakterystyk sztywnościowo-tłumieniowych filmu oleju smarującego łożyska oporowego oraz tłumika drgań wzdłużnych. W wyniku obliczeń uzyskuje się częstotliwości i postacie drgań własnych, amplitudy drgań wymuszonych oraz reakcje dynamiczne łożyska oporowego i tłumika wymuszające drgania innych konstrukcji okrętowych.

DGR – obliczenia drgań giętnych linii wałów

Program przeznaczony do analiz drgań giętnych okrętowych linii wałów, z uwzględnieniem charakterystyk sztywnościowo-tłumieniowych łożysk poprzecznych (szczególnie łożyska rufowego) oraz konstrukcji kadłuba statku. Łożyska mogą być modelowane jako podpory ciągłe o zadanym rozkładzie elastyczności. Program jest oparty na *Metodzie elementów skończonych*. W wyniku obliczeń uzy-

skuje się częstotliwości i postaci drgań własnych, naprężenia i amplitudy drgań wymuszonych oraz reakcje dynamiczne łożysk poprzecznych wymuszające drgania innych konstrukcji okrętowych.

Przykłady przedstawiania wyników obliczeń

1. Obliczenia drgań kadłuba

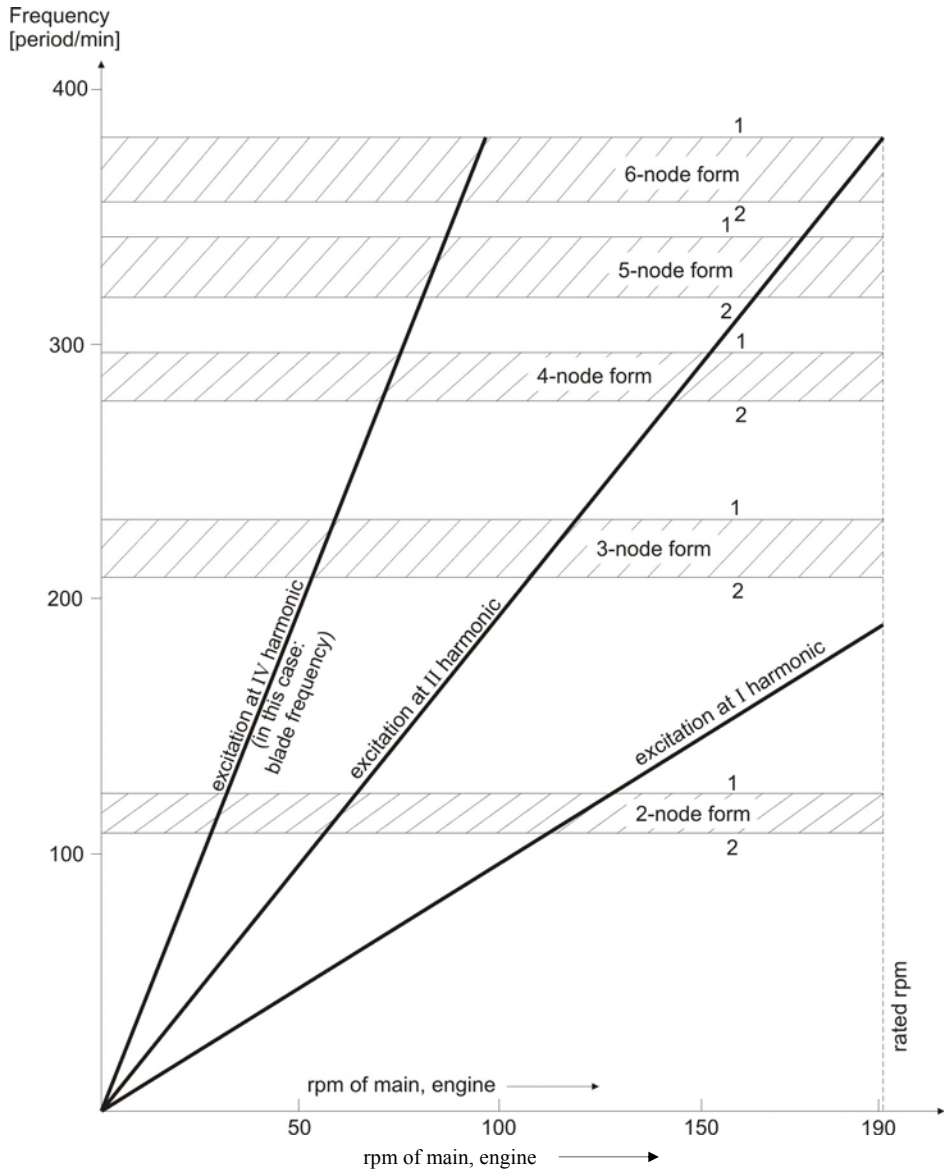
Wyniki obliczeń drgań kadłuba przedstawione są na wykresie (rys. Z 3-1), na którym na osi pionowej naniesione są częstotliwości drgań, zaś na osi poziomej obroty SG lub śruby napędowej. Dla każdej z policzonych częstości drgań własnych nanosi się częstotliwości drgań danej formy dla stanu balastowego (1) oraz największego stanu ładunkowego (2). Są to więc graniczne częstości (najwyższa i najniższa dla danej formy drgań), w obszarze których leżą częstości dla innych pośrednich stanów ładunkowych.

W celu stwierdzenia możliwości wystąpienia rezonansu kadłuba w obrotach nominalnych nanosi się na wykresie proste odpowiadające wymuszeniom od SG: pierwsza i/lub druga harmoniczna w zależności od typu silnika oraz od śruby napędowej pierwsza i/lub druga częstość skrzydłowa. Jeżeli prosta przedstawiająca częstość wymuszenia przecina pole częstotliwości drgań własnych (zakresowane) dla jednej z form drgań, np. w pobliżu obrotów nominalnych, wówczas istnieje niebezpieczeństwo wystąpienia rezonansu drgań kadłuba w warunkach eksploatacji (patrz rys. Z 3-1).

2. Obliczenia drgań linii wału

Obliczenia częstości drgań wzdłużnych wykonuje się w funkcji sztywności łożyska oporowego ze względu na niemożność dokładnego określenia jego sztywności. Następnie na podstawie pomiarów przeprowadzonych na innych statkach lub z literatury określa się przewidywany zakres sztywności i przeprowadza się analizy, czy częstość wymuszająca (pierwsza lub druga skrzydłowa) nie przecina wykresu częstości drgań własnych w wyznaczonym zakresie, co świadczyłoby o możliwości wystąpienia rezonansu (rys. Z 3-2). Analogiczne postępowanie prowadzi się w przypadku drgań giętych wału (rys. Z 3-3), przy czym obliczenie częstości drgań własnych wykonuje się dla zmiennej wartości sztywności łożyska stewowego, przy stałych parametrach sztywności łożysk pośrednich.

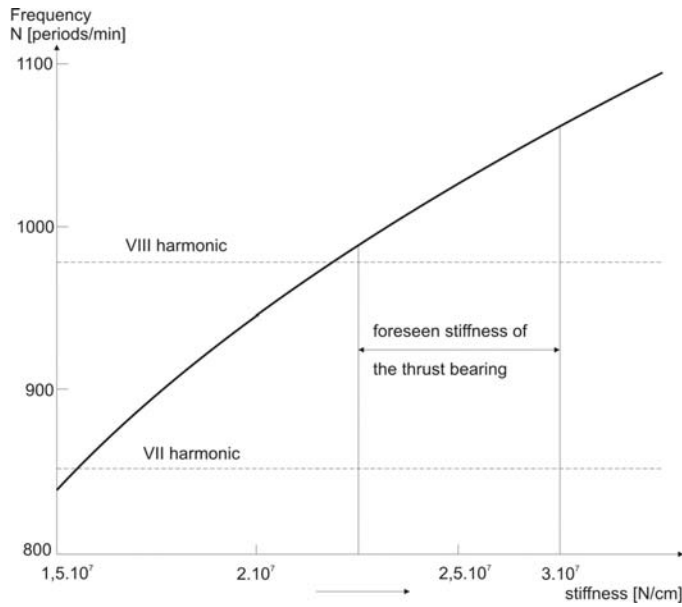
WYNIKI OBLICZEŃ DRGAŃ PIONOWYCH KADŁUBA STATKU



Rys. Z 3-1

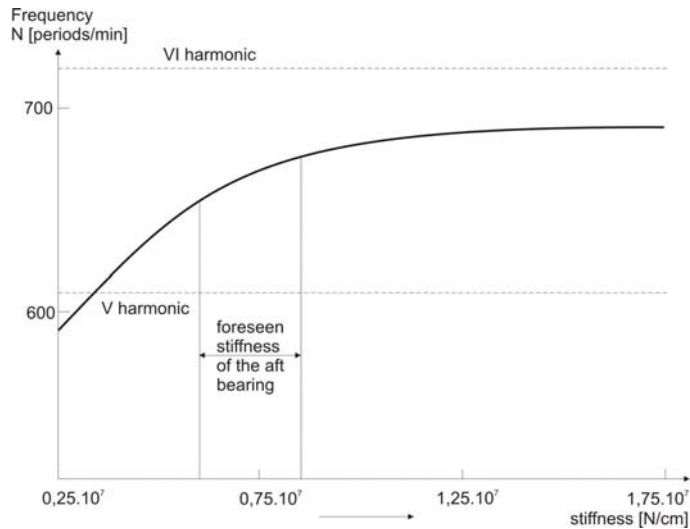
Częstości wymuszeń SG oraz śruby na tle częstości drgań własnych
 1 – stan balastowy. 2 – stan ładunkowy

PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ DRGAŃ WAŁU statku typu B76/...



Rys. Z 3-2

Czystość własna drgań wzdłużnych linii wałów w funkcji sztywności łożyska oporowego



Rys. Z 3-3

Czystość własna drgań giętych linii wału w funkcji sztywności łożyska stewowego

PRZYBLIŻONE WYZNACZANIE CZĘSTOŚCI DRGAŃ WŁASNYCH KADŁUBA

Wartości przybliżone częstości drgań własnych dla pierwszej, dwuwęzłowej formy drgań giętych pionowych kadłuba otrzymać można ze znanego wzoru Schlicka. Dogodne jest użycie tej jego postaci, która zawiera współczynniki sprawdzone dla danego typu statku.

Wzór ze współczynnikiem kształtu wprowadzonym przez P.Y. Changa ma postać:

$$f_1 = 63350k \sqrt{\frac{I}{\Delta L^3}} \quad (\text{Hz})$$

gdzie:

I – moment bezwładności przekroju poprzecznego na śródkręciu, [m^4]

Δ – wyporność (t)

L – długość (m)

współczynnik kształtu:

$$k = \left\{ \left(1 + \frac{B}{2T} \right) \left[1 + 21.5 \left(\frac{B}{H} - 0.275 \right) \left(\frac{H}{L} \right)^2 \right] \right\}^{-\frac{1}{2}}$$

gdzie:

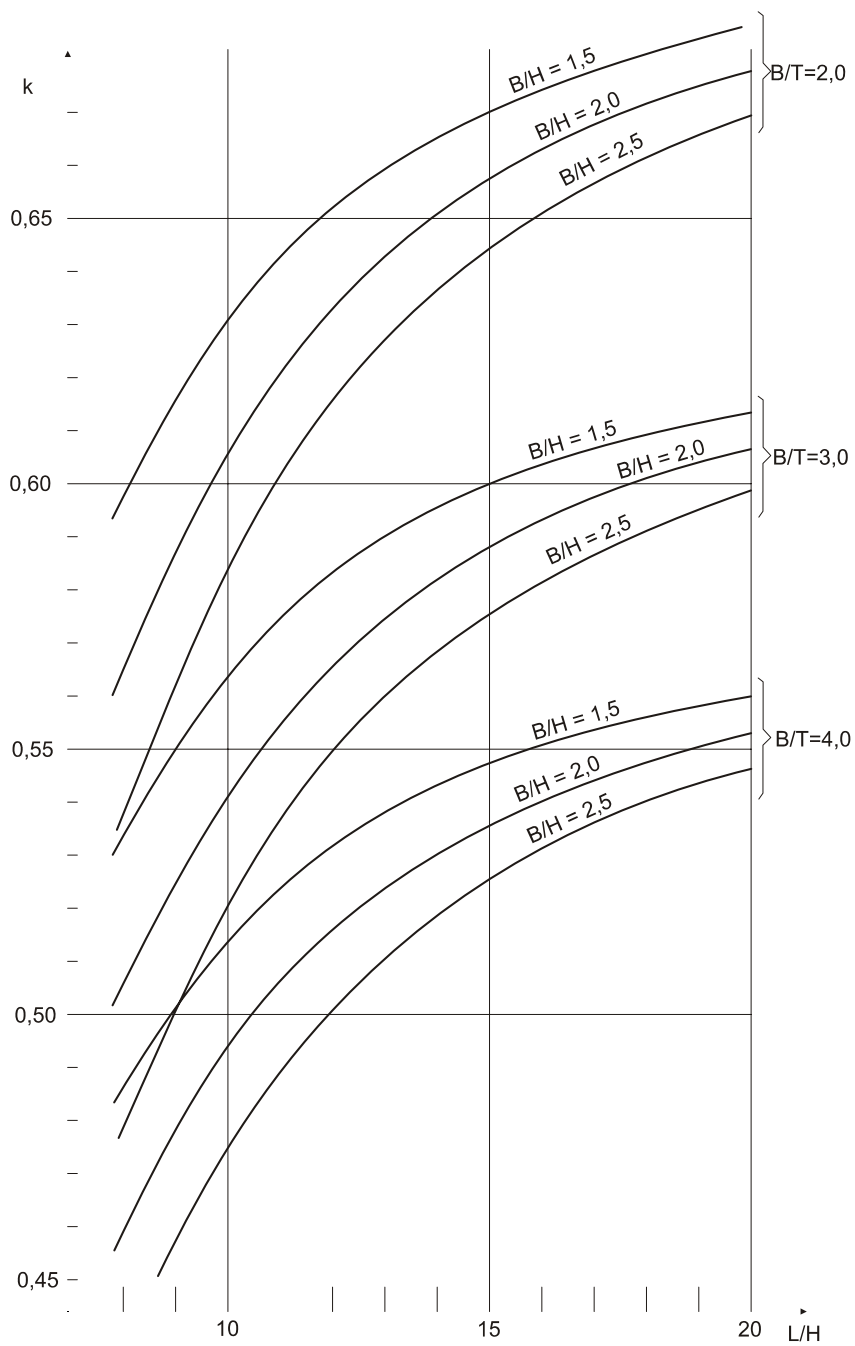
L, B, H, T – wymiary główne kadłuba, odpowiednio: długość, szerokość, wysokość boczna do pokładu wytrzymałościowego, zanurzenie.

Wartości współczynnika kształtu dla najczęstszych proporcji wymiarowych ilustruje rys. Z 4-1.

Częstotliwości drgań własnych dla form od 3- do 7-węzłowej można w przybliżeniu oszacować z rys. Z 4-2.

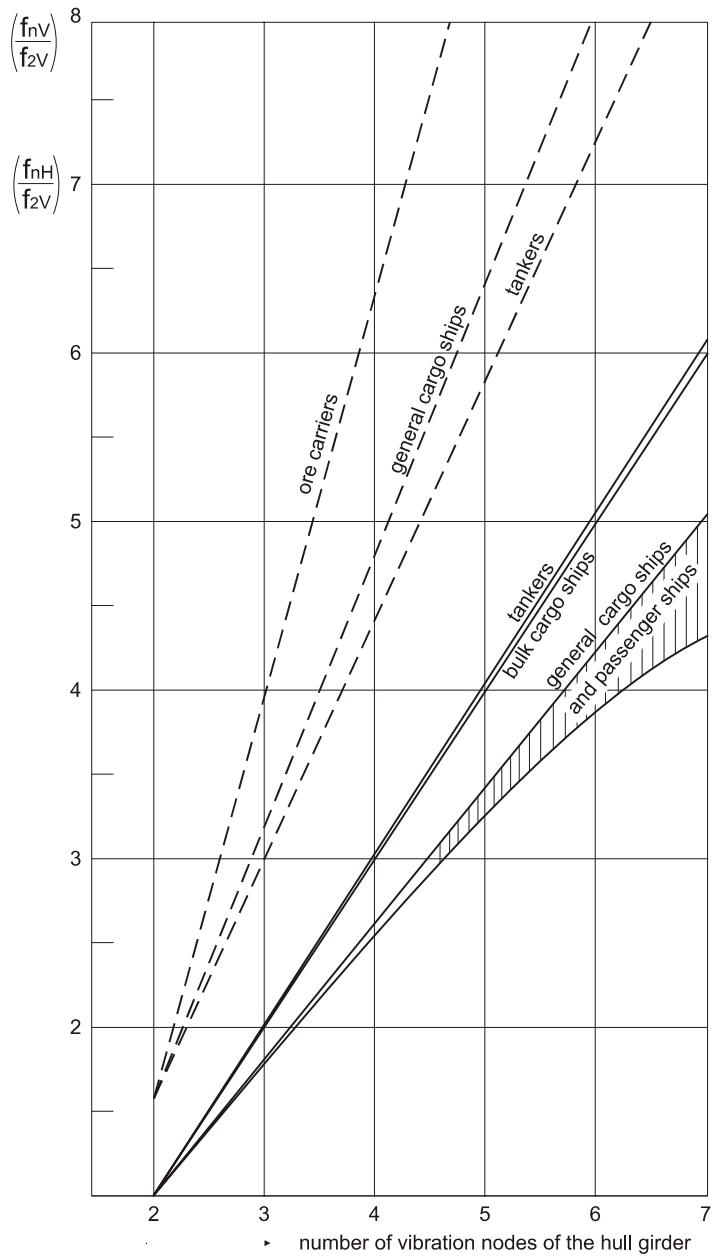
Źródła:

1. P. Y. Chang – The effect of Varying Ships Hull Proportions and Hull Materials on Hull Flexibility, Bending and Vibratory Stressess, SSG-288, Final Report. US Coast Guard Headquarters, Washington 1979
2. F. H. Todd – Ship Hull Vibration, London 1961.



Rys. Z 4-1

Wartość współczynnika kształtu k dla najczęstszych proporcji wymiarowych kadłuba



Rys. Z 4-2

Szacunkowe wyznaczanie częstotliwości drgań form wyższych niż dwuwęzłowe:
 dla drgań giętych pionowych – linie ciągłe; dla giętych poziomych – linie przerywane.
 f_{2V} – częstotliwość pierwszej (dwuwęzłowej) formy drgań giętych pionowych belki kadłuba
 n – liczba węzłów drgań belki kadłuba..

WPLYW FALI REGULARNEJ NA DRGANIA REZONANSOWE KADŁUBA

Fale uderzające o kadłub powodują zawsze jego mniej lub bardziej intensywne drgania. W szczególnych jednak przypadkach, gdy czasowe następstwo takich impulsów wzbudzających będzie regularne i bliskie lub równe okresowi drgań własnych kadłuba, amplitudy osiągnąć mogą wartości zagrażające jego trwałości.

Okres spotkania dla warunków ustalonych wyznacza się z zależności:

$$T_e = \frac{\lambda}{c - v \cos \beta}$$

gdzie:

λ – długość fali (m)

c – prędkość fali (m/s)

v – prędkość statku (m/s)

β – kąt kursowy statku względem fali (stopnie)

$\beta = 0^\circ$ – fala z rufy (nadażająca)

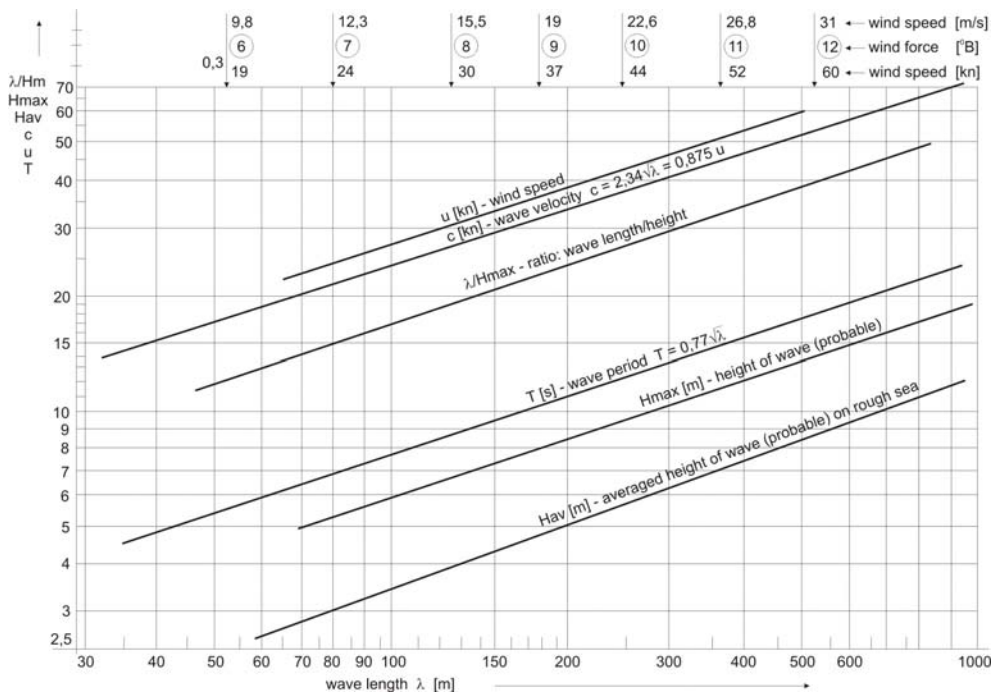
$\beta = 180^\circ$ – fala od dzioba (przeciwna)

Wartości: λ i c przyjmuje się z danych hydrograficznych dotyczących linii żeglugowej, na której statek będzie pływał najczęściej.

W niektórych przypadkach można posługiwać się uśrednionym wykresem dla rozkołysanego morza, pokazanym na rys. Z 5-1.

Źródła:

1. J. Dudziak – Okręt na fali. (Ship on wave). Gdańsk 1980. Wyd. Morskie
2. Kenneth C. Barnaby – Basic Naval Architecture, Hutchinson. London 1969.
3. M. K. Ochi – Wave Statistics for the Design of Ships and Ocean Structures. Trans. SNAME Vol. 86, 1978.



Rys. Z 5-1

Najbardziej prawdopodobne parametry fali morskiej dla akwenu o wymiarze minimalnym 300 Mm, rozkołysanego kilkudniowym wiatrem (tzw. wykres Zimmermana)

OCENA PRZEŚWITU OKNA ŚRUBOWEGO W KIERUNKU PIONOWYM

W przypadku, gdy prawdopodobne jest wystąpienie kawitacji tak dużej, że generowane będą na rufie siły powodujące drgania (to znaczy, gdy ilość pęcherzyków powstających na powierzchni skrzydła zmienia się gwałtownie przy przechodzeniu przez pole obniżonej prędkości dopływu strumienia), to wtedy wartość minimalna prześwitu może być oszacowana ze wzoru:

$$\left(\frac{c}{D}\right)_{min} \geq \frac{0.96}{\sqrt{(AB)^2 + A\left(\frac{15}{nD}\right)^2} - AB} - 0.05$$

gdzie:

$$A = 0.01 \frac{Z^{\frac{3}{2}}}{\left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{4}{3}}}$$

$$B = \frac{W_{Tmax} - W_T}{1 - W_T} \frac{1}{\sqrt{\delta_A}}$$

$$\delta_A = \frac{(h_a + 10.4)9.81}{0.5v_s^2(1 - W_T)^2}$$

- c – odległość od końca skrzydła do poszycia, w górnym położeniu tego skrzydła, [m]
- D – średnica śruby, [m]
- n – obroty śruby, [cps]
- Z – liczba skrzydeł śruby
- t – największa grubość skrzydła na promieniu $0.7 R$, [m]
- h_a – zanurzenie mierzone do osi łożyska rufowego, z uwzględnieniem fali rufowej, [m]
- v_s – prędkość statku, [m/s]
- W_T – współczynnik strumienia nadążającego, tzw. średni skuteczny współczynnik Taylora
- W_{Tmax} – szczytowa wartość współczynnika Taylora na $0,9 R$, w górnej części strumienia dopływowego

W przypadku, gdy istnieje możliwość zaprojektowania śruby wolnej od kawitacji we wszystkich położeniach jej skrzydeł w strumieniu zakadłubowym, minimalną wielkość prześwitu w kierunku pionowym między poszyciem a wierzchołkiem skrzydła śruby oszacować można ze wzoru:

$$\left(\frac{c}{D}\right)_{min} \geq \frac{0.64 n D}{z^{\frac{3}{4}}} \left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{2}{3}} - 0.05$$

W obu powyższych formułach założono wartość ciśnienia dopuszczalnego na poszyciu nad śrubą:

$$\Delta p_z = 800 \cdot 9.81 = 7848 \quad [\text{N/m}^2]$$

co jest słuszne tylko dla standardowych konstrukcji rufy.

Źródła:

1. K. O. Holden – Excitation Forces and Afterbody Vibrations Induced by Marine Propeller Blade Cavitation.
Norwegian Maritime Research No 1/1979.
2. H. Jarzyna, T. Koronowicz – Analiza oraz ocena i propozycje zmian kryteriów określania dopuszczalnych sił wymuszających drgania kadłuba, stosowanych we wstępnej fazie projektowania statku. Gdańsk 1980.
(Analysis, estimation and improvement of criteria to evaluate the forces exciting ship vibration. Study for early stage of design, prepared on PRS order. Gdańsk, 1980)

WSKAŹNIK DO OCENY NIEJEDNORODNOŚCI POŁA PRĘDKOŚCI OPARTY NA WYNIKACH PRACY HOLDENA

Niejednorodność pola prędkości można określić poprzez różnicę współczynników strumienia nadążającego:

$$W_{max} - W_T$$

gdzie:

W_{max} – maksymalna wartość nominalnego współczynnika strumienia nadążającego w rejonie $r/R = 0.9 \div 1.0$

W_T – średni skuteczny współczynnik Taylora.

Dopuszczalną wartość ($w_{max} - w_T$), z punktu widzenia kawitacji i drgań indukowanych przez śrubę na poszyciu kadłuba, można wyznaczyć ze wzoru:

$$(W_{max} - W_T) \leq 0.02 \frac{\Delta p_{dop} \sqrt{h+10} \left(2 \frac{c}{D} + 0.1\right)^k}{(nD)^2 v_s f_2} \frac{\Delta J}{J} \quad (1)$$

gdzie:

Δp_{dop} – dopuszczalna amplituda ciśnienia na poszyciu kadłuba (Pa).

Zalecana wartość dopuszczalnej amplitudy ciśnienia na poszyciu dla typowych rozwiązań konstrukcyjnych kadłuba wynosi $\Delta p_{dop} = 4000$ Pa

h – zanurzenie osi śruby [m]

n – obroty śruby [cps]

D – średnica śruby [m]

v_s – prędkość statku [m/s]

c – prześwit w kierunku pionowym między poszyciem a wierzchołkiem skrzydła [m]

k – współczynnik określany następująco:

$$k = 1.63 + 1.4 \frac{c}{D} \quad \text{for} \quad \frac{c}{D} \leq 0.45$$

$$k = 1.00 \quad \text{for} \quad \frac{c}{D} \geq 0.45$$

$$f_2 = \frac{(fP)_{0.95}}{(fP)_{0.8}}$$

stosunek iloczynu maksymalnej strzałki wygięcia profilu f i skoku P

na promieniu $r/R = 0.95$, do skoku na promieniu $r/R = 0.8$

Jeśli f_2 jest mniejsze od 0,3 – we wzorze (1) przyjmuje się $f_2 = 0.3$; jeśli f_2 wynika większe od 0.8 – przyjmuje się $f_2 = 0.8$

$$J = \frac{v_s}{nD} \quad \text{–} \quad \text{współczynnik posuwu.}$$

Poprawkę ΔJ pozwalającą określić różnicę ($W_{\max} - W_T$) można wyznaczyć według następującego algorytmu:

$$1. \quad \left(\frac{A_e}{A_o}\right)_c = \frac{T}{1850 n^2 D^4 \left[\frac{h+10}{nD^2} + 0.066 \right] \left[1.067 - 0.23 \left(\frac{P}{D}\right)^{0.8} \right]} \quad (2)$$

gdzie:

T – napór [N]

h – zanurzenie osi śruby [m]

n – obroty śruby [cps]

D – średnica śruby [m]

$\left(\frac{P}{D}\right)^{0.8}$ – współczynnik skoku na promieniu $r/R = 0.8$

$$2. \quad f_1 = \frac{\left(\frac{A_e}{A_o}\right)_c 2.13 D}{1_{0.9} z} \quad (3)$$

gdzie:

$A_o = \frac{\pi D^2}{4}$, A_e – powierzchnia rozwinięta skrzydeł śruby [m²]

D – średnica śruby, [m]

z – liczba skrzydeł

$1_{0.9}$ – długość profile na promieniu $r/R = 0.9$ [m]

$$3. \quad \Delta k_T = \frac{f_1 - 1.0}{f_1} \frac{T}{\rho D^4 n^2} \quad (4)$$

gdzie:

T – napór [N]

ρ – gęstość wody $\left(\rho = 1025 \cdot \left[\frac{Ns^2}{m^4}\right]\right)$ dla wody morskiej)

n – obroty śruby [cps]

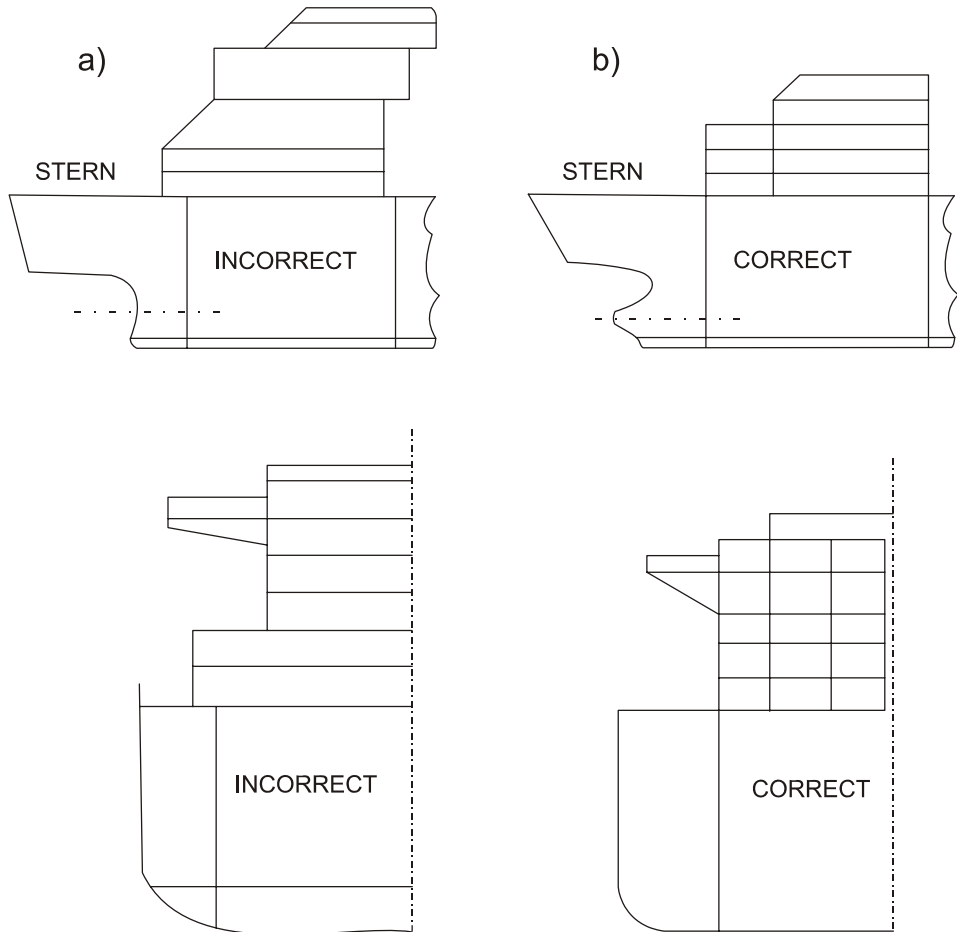
$$4. \quad \Delta J = \Delta k_T \frac{1}{\frac{\Delta k_T}{\Delta J}} = \frac{\Delta k_T}{0.06(2+z)} \quad (5)$$

gdzie:

z – liczba skrzydeł

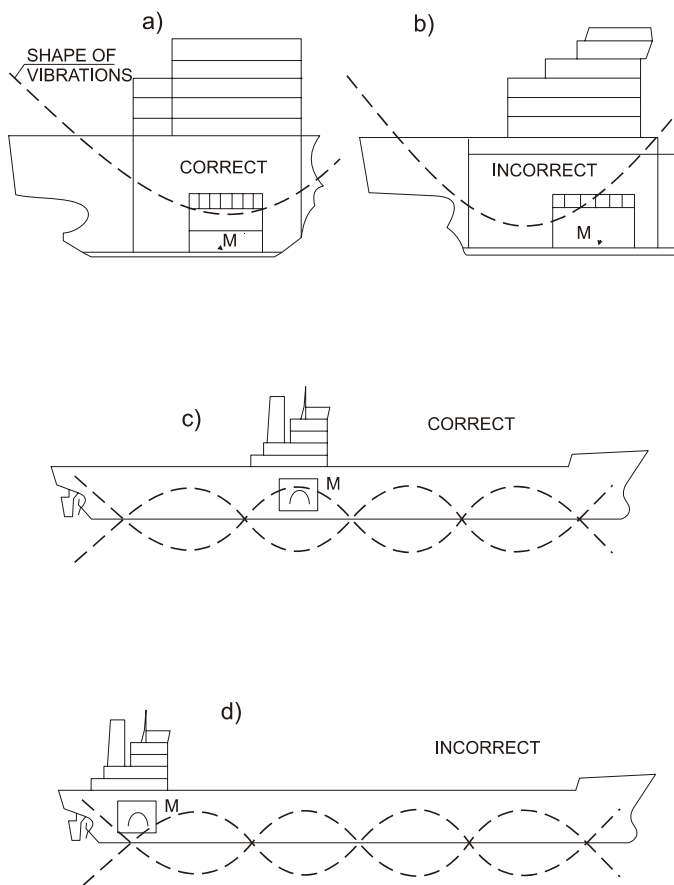
W przypadku, gdy nie jest znana wartość efektywnego współczynnika strumienia nadążającego, występującego we wzorze (1), można go wyznaczyć poprzez pomnożenie średniej nominalnej wartości współczynnika strumienia nadążającego W_n przez wartość 0.7 (za autorem kryterium w przepisach Det Norske Veritas). Dodatkowo, niezależnie od wyżej przedstawionego kryterium, maksymalna wartość W_{max} nie powinna przekraczać 0,8. Jeśli warunek ten nie jest spełniony, można spodziewać się dużych pulsacji ciśnień na poszyciu kadłuba, hałasów i erozji kawitacyjnej. W przypadku $W_{max} > 0,8$ należałoby zmienić kształt rufy statku. (Źródło: tytuły cytowane w załączniku 6.).

**PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH
NIEPOPRAWNYCH ZE WZGLĘDU NA POWSTAWANIE
I ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ DRGAŃ**



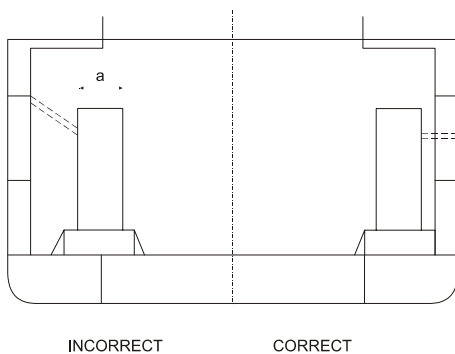
Rys. Z 8-1

Wersja b) ma nadbudówkę niską, zwartą, mniej podatną (ze względu na grodzie wzdłużne, krótsze skrzydła mostka), dobrze osadzona w wiązaniach kadłuba. Okno śrubowe zapewnia pędnikowi bardziej jednorodny strumień dopływowy.



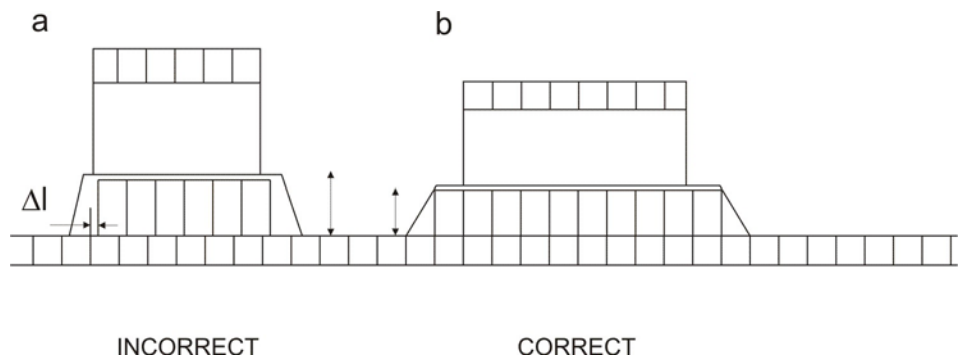
Rys. Z 8-2

Wadliwe położenie nadbudówki (b. d) oraz silnika napędowego względem formy drgań kadłuba. Jest to szczególnie ważne, gdy wielkości nierównoważonych i wymuszających momentów silnika są znaczne.



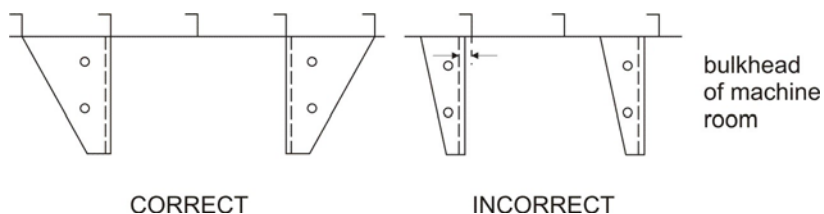
Rys. Z 8-3

Błędne i poprawne dosztywnienie zbiornika



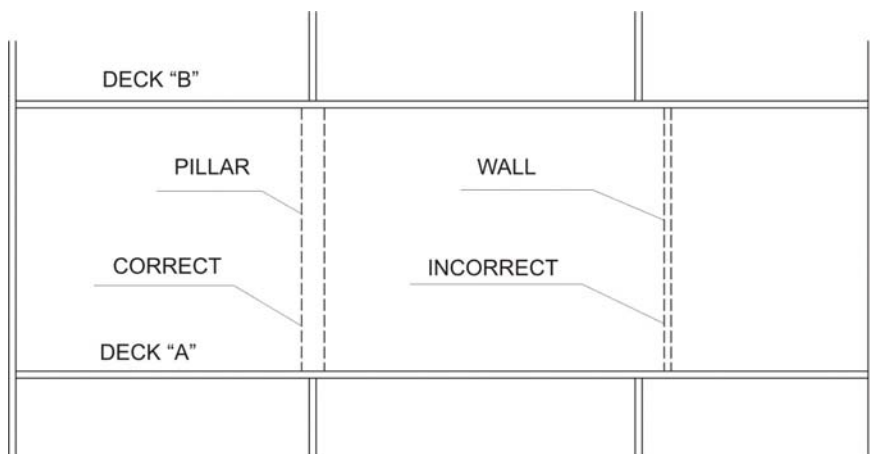
Rys. Z 8-4

Fundament zespołu prądowórczego zapasowego powinien być możliwie najniższy i poprawnie związany z usztywnieniami dna



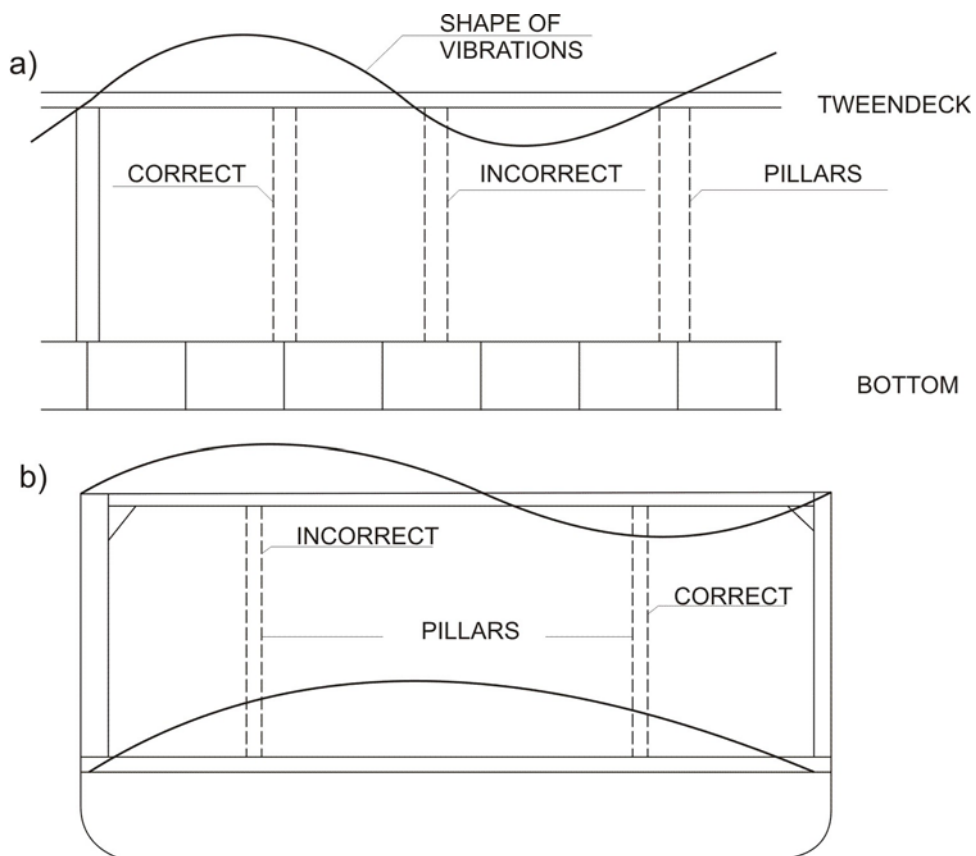
Rys. Z 8-5

Półki wspornikowe do posadzeń wyposażenia, umieszczane na grodziach, ściankach i innych elementach kadłuba, powinny być związane poprawnie z ich usztywnieniami, aby nie powodować efektu membranowego.



Rys. Z 8-6

Błędne i poprawne dosztywnienie pokładu



Rys. Z 8-7

Biedne i poprawne dosztywnienie:

- a) drgającego wzdłużnika międzypokładu
- b) drgającej ramy wręgowej

Źródło:

W. Ojak – Kontrola i zasady odbioru statków pod kątem drgań. Gdańsk, 1979, Report.
 (W. Ojak – How to control and approve the ship in order to have vibration off. Gdańsk, 1979)

BIBLIOGRAFIA

1. Normy i publikacje oficjalne wymienione w Załączniku 1 oraz podane jako źródło z załączników 4, 5, 6, 7.
2. Bureau Veritas, 1979 – Recommendations Designed to Limit the Effect of Vibrations on Board Ships. Guidance Note, Paris, June 1979.
3. Det Norske Veritas – Guidelines – Roll On/Roll Off Ships. May 1980.
4. Det Norske Veritas – Prevention of Harmful Vibration in Ships, July 1983.
5. Report of the Research Committee on Machinery Vibration of MESJ – Trouble due to Vibration on Machinery for Marine Use. Bulletin of Mar. Eng. Soc. in Japan No 4/1979.
6. O. H. Solumsmoen – Ship Vibration Experience from Service Measurements. Publication No. 96/1977 DNV.
7. “Vibration Control in Ships”. Edited by A.S. Veritec, Marine Technology Consultants, Hovik, Norway, 1985.
8. Cyril M.Harris – Shock and Vibration Handbook, third edition, Mc Graw – Hill Book Co, 1988, chapter 19.
9. Lech Murawski – Static and Dynamic Analyses of Marine Propulsion Systems, 2003, ed. Politechnika Warszawska.
10. Iwer Asmussen, WolfgangMenzel, Holgen Mumm – Ship Vibration. Issue No 5/2001 of Germanischer Lloyd
11. Tong Ming Wu – Engineering Analyses on Vibrations Characteristics of Merchant Vessels with Theoretical and Onboard Test Approaches. Marine Technology and SNAME News, Vol. 38 No. 4 October 2001
12. Code for Shipboard Vibration Measurements. Technical and Research Code C-12. SNAME, New York, January 1975
13. Acceptable Vibration of Marine Steam and Heavy-duty Gas Turbine and Auxiliary Machinery Plants. Technical and Research Code C-5.SNAME, New York, September 1976
14. Vasiliev, Glozman, Golubiev, Sborovskii – Sudovyye Fundamienty, Leningrad 1969
15. Włodzimierz Ojak – Propozycje dopuszczalnych poziomów drgań na statkach handlowych. Gdańsk 1973 , Centrum Techniki Okrętowej
16. Szantyr J. A. – A new method for the analysis of unsteady propeller cavitation and hull surface pressures. Trans.RINA, vol. 127, 1985