

SHIP MOVEMENT AS A STIFF BODY INDUCED BY A MINE EXPLOSION

Stanisław Dobrociński

Naval University of Gdynia
ul. Śmidowicza 69 Gdynia, Poland
tel.:+48 586262638
email: s.dobrocinski@amw.gdynia.pl

Adam Pawłędzio

Naval University of Gdynia
ul. Śmidowicza 69 Gdynia, Poland
tel.:+48 586262787
email:a.pawledzio@amw.gdynia.pl

Abstract

In the paper there are presented the results of calculations of the ship movement parameters which was forced by a pressure wave induced during noncontact underwater explosion. The object of research makes up a minesweeper 207M project. Its hull and the superstructure are completely made of plastic what makes it very stiff. To realize the aim of calculations the mesh of element forming the shell hull was made on the basis of the body lines. Mapping accuracy of the hull was verified with the hydrostatic curves for few vales of the ships depth.

The ship is treated as a stiff body. Disposition of the mass on the ship was defined on the basis of the ships documentation. Calculations were carried out for a full load ship displacement. Added masses were found for the stationary ship when the sea surface is flat.

Calculations were carried out for a 3 different variants of the constant mass charge position with simulated the sea mine. The charge was placed always on the same depth in the symmetric plane of the ship. Due to assumed high depth of the sea the influence of the reflected pressure wave from the sea bottom was neglected. The first pressure fluctuation was described by Cole's formula.

Defined ship movement parameters provide some information about potential loads of the ship construction and prognosis of damage. Impulse character of load is noticeable on the velocity and acceleration curves.

Keywords: warship, stiff body movement, underwater explosion

RUCH OKRĘTU JAKO BRYŁY SZTYWNEJ SPOWODOWANY WYBUCEM MINY

Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki obliczeń parametrów ruchu okrętu poddanego oddziaływaniu fali ciśnienia od niekontaktowego wybuchu podwodnego. Obiektem badań jest trałowiec typu 207 M, będący na wyposażeniu Marynarki Wojennej RP. Jest to jednostka wykonana z laminatu poliestrowo-szklanego, charakteryzująca się stosunkowo dużą sztywnością. Wykorzystana do obliczeń siatka elementów dyskretnych odwzorowująca kadłub okrętu została wykonana na podstawie linii teoretycznych okrętu. Dokładność odwzorowania kadłuba sprawdzono porównując wyporność okrętu obliczoną programem komputerowym z krzywą wyporu zamieszczoną na wykresie krzywych hydrostatycznych okrętu.

W rozważaniach okręt traktuje się jako bryłę sztywną. Rozkład masy okrętu określono na podstawie dokumentacji okrętowej dla stanu załadowania okrętu odpowiadającego wyporności pełnej. Uogólnione masy wody towarzyszącej obliczono dla nieruchomego okrętu przy założeniu płaskiej powierzchni akwenu wodnego

Obliczenia parametrów ruchu okrętu przeprowadzono dla 3 różnych wariantów rozmieszczenia ładunku wybuchowego o stałej masie symulującego minę morską.

Ładunek znajdował się na stałej głębokości w płaszczyźnie symetrii okrętu. Ze względu na założoną znaczną głębokość akwenu pominięto wpływ fali ciśnienia odbitej od dna akwenu. Pierwszą pulsację ciśnienia opisano wzorami Cole'a, natomiast pozostałe pominięto.

Wyznaczone parametry ruchu okrętu, stanowią informację o potencjalnych obciążeniach konstrukcji oraz umożliwiają prognozę jej uszkodzeń. Impulsowy charakter obciążenia jest wyraźnie widoczny na wykresach funkcji prędkości i przyspieszenia.

Słowa kluczowe: okręt, ruch bryły sztywnej, podwodny wybuch

1. Wprowadzenie

Okręt wojenny ze względu na swoją specyfikę jest narażony na różnego rodzaju obciążenia udarowe, jako skutki działań środków bojowych. Jednym z zagrożeń jest fala ciśnienia powodowana podwodnym wybuchem min, która dociera do kadłuba okrętu z prędkością rozchodzenia się dźwięku w wodzie. Istnieje liczna grupa zjawisk towarzyszących detonacji materiału wybuchowego w ośrodku płynnym. W przypadku wybuchu kontaktowego oprócz fali ciśnienia konstrukcja okrętu może mieć kontakt z pęcherzem gazowym powstałym częściowo z produktów spalania materiału wybuchowego oraz w wyniku ruchu cząsteczek wody, którym nadana została określona energia kinetyczna w początkowej fazie detonacji. Skutki wybuchu kontaktowego są z reguły zdecydowanie poważniejsze od skutków powstałych po wybuchu niekontaktowym, gdy występuje tylko oddziaływanie fali ciśnienia. Obecne kierunki rozwoju broni podwodnej wskazują, że podczas działań wojennych zdecydowanie częstszym przypadkiem może być wybuch niekontaktowy. Konstruowane miny morskie posiadają specjalistyczną aparaturę elektroniczną, która jest w stanie zarejestrować obecność okrętu z dystansu kilkudziesięciu, a nawet kilkuset metrów. W takim przypadku detonatory kontaktowe nie są potrzebne, a koszt utworzenia pola minowego zdecydowanie mniejszy.

2. Sformułowanie problemu

Okręt poddany oddziaływaniu podwodnej fali ciśnienia jest narażony na uszkodzenia, które w swoich skutkach mogą spowodować utratę jego manewrowości lub w skrajnych wypadkach zatonięcie. Wówczas celowe jest działanie, które ma na celu zapewnienie okrętowi większego bezpieczeństwa w razie nieprzewidzianego ataku w postaci detonacji miny morskiej. Jest to możliwe między innymi poprzez odpowiedni dobór konstrukcji wiązań kadłuba okrętu lub poprzez dostarczenie dowódcy okrętu informacji o potencjalnym zagrożeniu, jeżeli zlokalizował wcześniej umieszczony ładunek wybuchowy w akwenu. Taką informację dla dowódcy okrętu można przygotować po analizie wartości przyspieszeń powstałych w konkretnych sytuacjach eksploatacyjnych. Wyznaczenie przyspieszeń w poszczególnych miejscach okrętu jest więc podstawowym celem opisywanego zagadnienia, na podstawie których można oszacować potencjalny zakres zniszczeń na okręcie. Najbardziej prawdopodobne miejsca uszkodzeń to elementy mocowania linii wałów okrętu oraz urządzenia elektroniczne. Należy wziąć pod uwagę, że wytrzymałość urządzeń i mechanizmów zamontowanych na okręcie nie stanowi jedyne kryterium przetrwania okrętu. W pewnych okolicznościach może mieć miejsce sytuacja, gdy żaden człowiek nie przetrwa podwodnej eksplozji, a zamontowane na jednostce pływającej mechanizmy, dzięki odpowiednim zabezpieczeniom, mogą być nadal sprawne.

3. Założenia wstępne

W matematycznym opisie ruchu okrętu wywołanego oddziaływaniem fali ciśnienia wprowadzono założenia podzielone na dwie grupy. Pierwsza dotyczy zjawisk, które towarzyszą ruchowi okrętu w środowisku morskim, druga natomiast związana jest z działaniem fali ciśnienia na okręt, powstałej po detonacji ładunku wybuchowego. Założenia w pierwszej grupie są następujące:

- okręt porusza się ruchem płaskim ze stałą prędkością;
- powierzchnia akwenu jest płaska (nie występuje falowanie);
- wpływ dna morskiego na rozkład ciśnienia hydrodynamicznego na poszyciu kadłuba okrętu jest pomijalnie mały;
- temperatura i gęstość wody są stałe;
- opływ cieczy w sąsiedztwie okrętu ma charakter potencjalny.

Druuga grupa założeń dotyczy oddziaływań podwodnej fali ciśnienia na kadłub okrętu. Dla tego zakresu założenia są następujące:

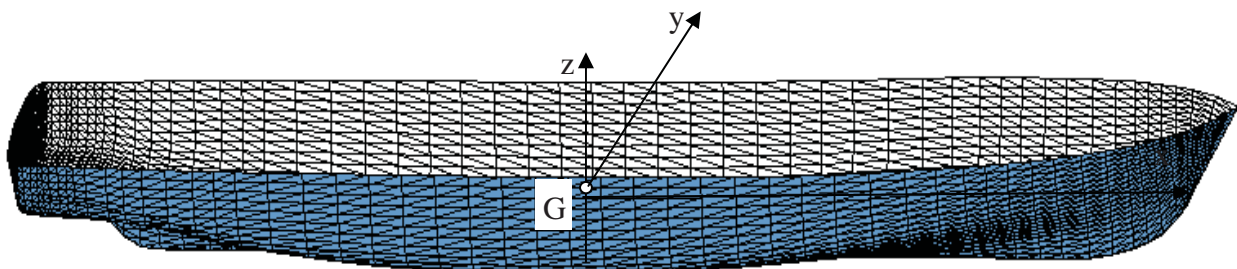
- oddziaływanie na poszycie okrętu fali odbitej od dna akwenu jest pomijalnie małe;
- kolejne pulsacje pęcherza gazowego generują fale ciśnienia, których działanie nie powoduje wzrostu maksymalnych wartości przyspieszeń okrętu;
- kąt padania fali ciśnienia na poszycie kadłuba okrętu mieści się w zakresie odbicia regularnego;
- wartość ciśnienia na kadłubie okrętu odpowiada ciśnieniu za frontem fali odbitej wyznaczonemu na podstawie opracowania [7];
- prędkość dźwięku w wodzie jest stała;
- podczas wybuchu emitowana jest tylko energia akustyczna, tzn. energia hydrauliczna nie wpływa na ruch okrętu.

4. Charakterystyka obiektu badań

Obiektem badań jest okręt typu 207 M, należący do grupy trałowców, których przeznaczeniem jest unieszkodliwienie lub niszczenie różnego rodzaju min postawionych na akwenach morskich. Kadłub i nadbudówka okrętu całkowicie zostały wykonane z laminatu poliestrowo-szklanego. Jest to materiał, który charakteryzuje się przede wszystkim amagnetycznością. Ponadto, jak wykazały badania, konstrukcja oparta na tworzywach sztucznych posiada większą od stali sztywność w przeliczeniu na jednostkę masy. Podstawowe dane techniczne okrętu typu 207 M są następujące:

- | | |
|---------------------------|--------------|
| - wyporność pełna | - 216,6 [t], |
| - długość całkowita | - 38,47 [m], |
| - szerokość konstrukcyjna | - 7,15 [m], |
| - zanurzenie średnie | - 1,74 [m], |
| - wysokość boczna | - 3,82 [m]. |

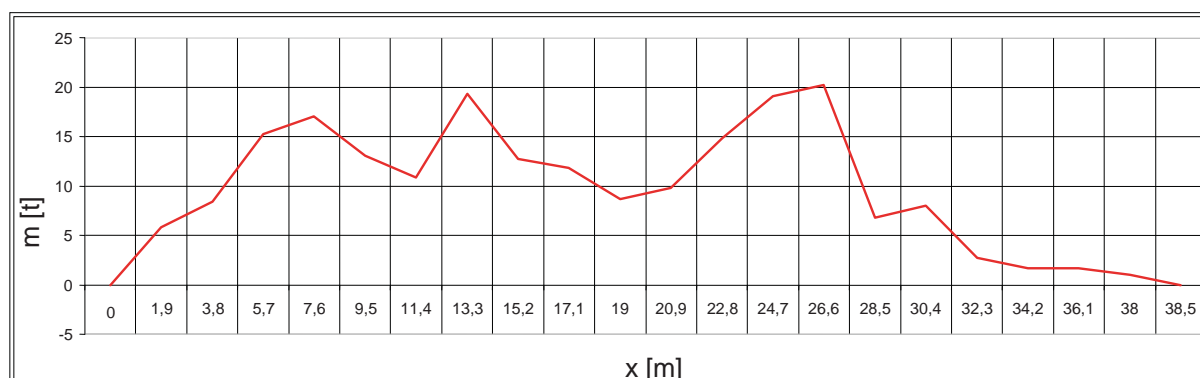
Polska Marynarka Wojenna posiada w swoim składzie cztery tego typu okręty. Wymienione dane techniczne mogą się nieznacznie różnić dla poszczególnych jednostek, gdyż okręty przechodzą modernizacje, co szczególnie wpływa na ich wyporność. Na rysunku 1. zaprezentowano siatkę elementów opisującą geometrię poszycia kadłuba okrętu typu 207M. Do jej budowy wykorzystano 4368 trójkątnych elementów trójwęzłowych.



Rys. 1. Siatka elementów kadłuba okrętu typu 207
Fig.1. Mesh of the shell hull ship's type 207

5. Krzywa rozkładu masy okrętu

Istotny wpływ na rozwiązanie badanego zjawiska posiada rozkład masy w płaszczyźnie symetrii okrętu. Posługując się dokumentacją udostępnioną przez Stocznnię Marynarki Wojennej wykonano krzywą rozkładu masy najpierw dla stanu załadowania odpowiadającego okrętowi pustemu, a następnie uzupełniono ją o ładunki wynikające z wyporności pełnej. W efekcie otrzymano krzywą przedstawioną na rysunku 2.



Rys. 2. Krzywa rozkładu masy dla okrętu pustego wzdłuż osi x
 Fig. 2. Curve of mass disposition of the ship along x axis

6. Parametry podwodnej fali ciśnienia

W wyniku detonacji ładunku wybuchowego w odległości R od obiektu w wodzie propaguje się fala ciśnienia. Ciśnienie panujące na jej froncie jest funkcją masy ładunku wybuchowego i odległości między nim, a rozpatrywanym obiektem. W literaturze dostępna jest liczna grupa wzorów opisujących funkcję ciśnienia w zależności od parametrów ładunku wybuchowego. Zależności te są wynikiem prowadzonych badań eksperymentalnych na obiektach rzeczywistych. W opracowaniu wykorzystamy zależności R. H. Cole'a, uważanego za prekursora badań podwodnych wybuchów. Określił on, że ciśnienie maksymalne można obliczać następującą zależnością [3, 4, 5]:

$$p_{\max} = 523 \left(\frac{\sqrt[3]{M}}{R} \right)^{1,13} 10^5 \quad [\text{Pa}] , \quad (1)$$

gdzie:

M – masa ładunku trotylu [kg];
 R – odległość od epicentrum wybuchu [m];

Podał on również następującą funkcję opisującą zmianę ciśnienia w czasie [3, 4, 5]:

$$p(t) = p_{\max} e^{\left(\frac{-t}{\theta}\right)} , \quad (2)$$

gdzie [3, 4]:

$$\theta = \sqrt[3]{G_M} \left[\frac{\sqrt[3]{M}}{R} \right]^{(-0,22)} 9,3 \cdot 10^{-5} , \quad (3)$$

t – czas [s].

Wielkość θ jest to stała czasowa. Jej wartość określa czas, kiedy ciśnienie fali uderzeniowej zmniejszy się do 36,8 % wartości ciśnienia maksymalnego [5].

Podane przez R. H. Cole'a wzory były wielokrotnie modyfikowane poprzez kolejnych badaczy zjawiska, lecz występujące rozbieżności, przy zastosowanych uproszczeniach, nie są istotne.

Wzory (1) i (2) do określenia siły parcia na poszyciu kadłuba okrętu w przedstawionej formie nie uwzględniają kąta padania fali ciśnienia. W referacie problem ten rozwiązano na podstawie opracowania [7].

7. Równanie ruchu okrętu

W opracowaniu przyjęliśmy założenie, że okręt przed detonacją ładunku wybuchowego porusza się ruchem jednostajnym lub pozostaje w spoczynku. Ruchu okrętu jako bryły sztywnej o trzech stopniach swobody, wymuszony falą ciśnienia, określimy rozwiązując równanie o następującej postaci:

$$M\ddot{\mathbf{X}} + C\dot{\mathbf{X}} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{P}_i \quad (4)$$

gdzie:

\mathbf{M} – macierz bezwładności układu;

\mathbf{C} – macierz tłumienia;

\mathbf{P} – wektor obciążeń;

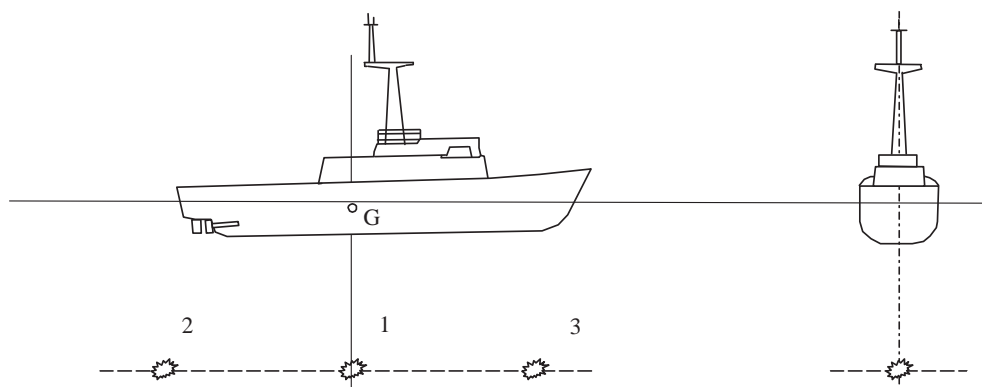
$\dot{\mathbf{X}}$ – wektor prędkości;

$\ddot{\mathbf{X}}$ – wektor przyspieszeń.

W macierzy \mathbf{M} znajdują się wyrazy określające bezwładność okrętu oraz uogólnione masy wody towarzyszącej, do wyznaczenia których wykorzystano metodę elementów brzegowych (MEB) [1, 2]. Na obciążenia, wyrażone przez wektor \mathbf{P} , składają się siły pochodzące od fali ciśnienia powstałej po podwodnym wybuchu oraz siły wyporu hydrostatycznego, które zależą od przemieszczeń kątowych i liniowych. Ponieważ siły zależą od poszukiwanych parametrów rozwiązania to otrzymujemy nieliniowy charakter równania ruchu.

8. Ruch okrętu wymuszony falą ciśnienia od niekontaktowych wybuchów podwodnych

Obliczenia parametrów ruchu okrętu przeprowadzono dla 3 wariantów rozmieszczenia ładunku wybuchowego o stałej masie (tabela 1). Usytuowanie ładunku wybuchowego w stosunku do okrętu jest podyktowane założeniem płaskiego ruchu. Ponadto detonacja ładunku wybuchowego znajdującego się w płaszczyźnie symetrii okrętu stanowi dla niego największe zagrożenie. Rysunek 3. obrazuje wymienione w tabeli 1. warianty rozmieszczenia ładunku wybuchowego.

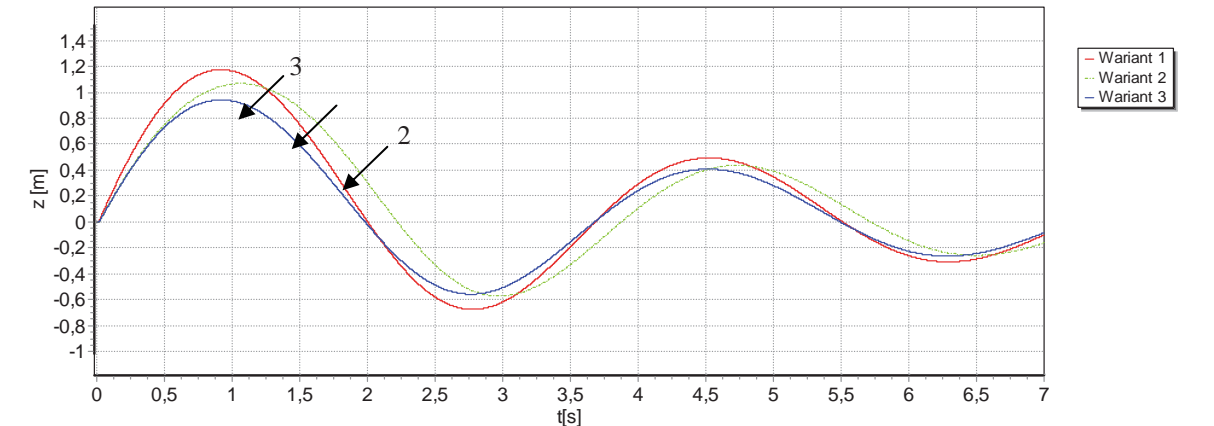


Rys. 3. Warianty rozmieszczenia ładunku wybuchowego; G – środek ciężkości okrętu
Fig. 3. Variants of the charge location; G – gravity centre

Tab. 1. Warianty rozmieszczenia ładunku wybuchowego
 Tab. 1. Variants of the charge location

Wariant	Masa i położenie ładunku wybuchowego			
	m_1 [kg]	x_1 [m]	y_1 [m]	z_1 [m]
1	50	0	0	$-20-z_G$
2	50	-20	0	$-20-z_G$
3	50	20	0	$-20-z_G$

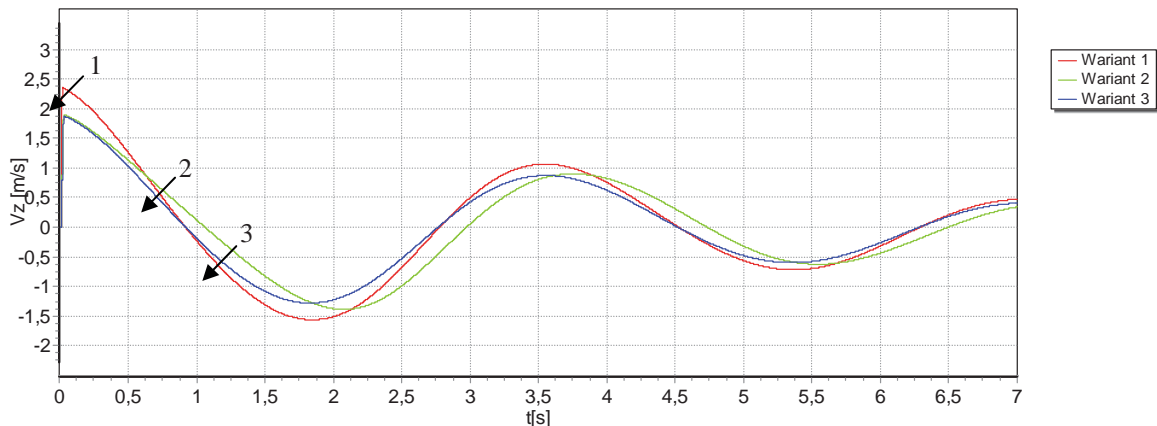
Obliczenia przeprowadzone dla wymienionych wariantów rozmieszczenia ładunku umożliwiają między innymi ocenę wpływu jego położenia na parametry ruchu okrętu.



Rys. 4. Zależność pionowego przemieszczenia środka ciężkości okrętu od parametrów wybuchu
 Fig. 4. Vertical mass movement dependence on the explosion parameters

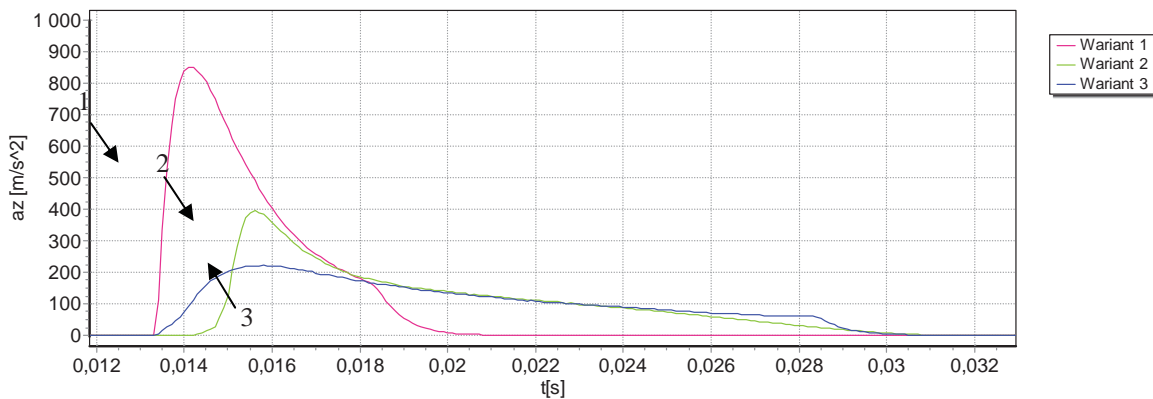
Na podstawie analizy wykresów przedstawionych na rysunku 4. stwierdzamy, że największe przemieszczenia pionowe środka ciężkości okrętu wystąpiły dla parametrów wybuchu z pierwszego wariantu obliczeniowego, gdy ładunek znajdował się pod śródkręciem, natomiast najmniejsze dla parametrów z wariantu 3. Pomimo, że ładunek w tym przypadku znajdował się bliżej okrętu niż w wariantcie 2., wystąpiły mniejsze przemieszczenia pionowe. Fakt ten wynika z kątów zawartych pomiędzy płaszczyzną symetrii okrętu, a kierunkami normalnymi do powierzchni elementów tworzących siatkę. W dziobowej części okrętu kąty te są bliskie 90 stopni. Wówczas składowe pionowe sił od fali ciśnienia przyjmują wartości znacznie mniejsze w porównaniu do części rufowej okrętu.

Zauważmy, że półokresy przemieszczenia pionowego środka ciężkości okrętu widoczne na rysunku 5. są takie same dla wszystkich wariantów obliczeń.



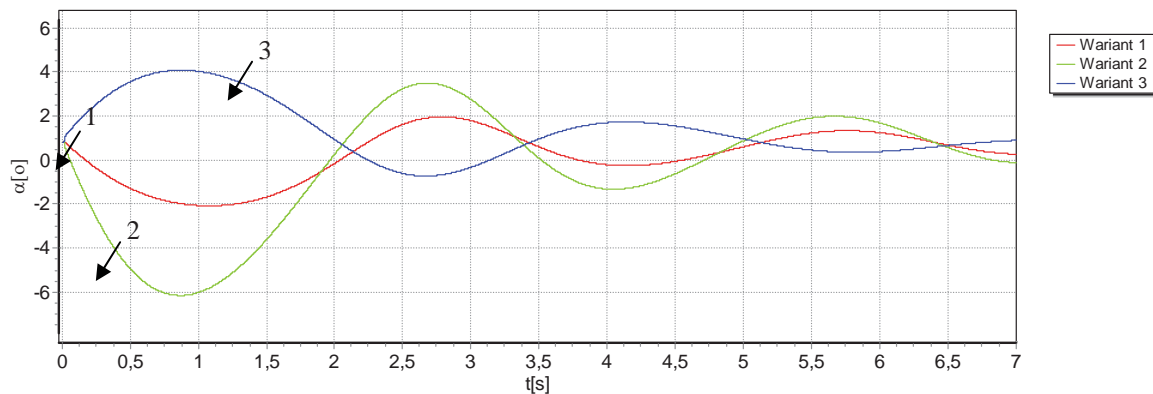
Rys. 5. Zmiany prędkości środka ciężkości okrętu w kierunku pionowym w różnych wariantach obliczeniowych
 Fig. 5. Velocity of the gravity centre in the vertical direction in the different variants

Prędkość środka ciężkości okrętu jest pochodną jego przemieszczenia, stąd też dla tego parametru występują analogiczne relacje pomiędzy wynikami otrzymanymi dla poszczególnych wariantów obliczeń jak dla przemieszczeń.



Rys. 6. Pionowe przyspieszenie środka ciężkości okrętu w pierwszych milisekundach ruchu
 Fig. 6. Vertical acceleration of the gravity centre during the first few milliseconds of the movement

Odległości ładunku wybuchowego od okrętu przekładają się na wartości pionowych przyspieszeń środka ciężkości okrętu (rys. 6). Im mniejszy dystans pomiędzy okrętem i epicentrum wybuchu, tym przyspieszenia są większe. Wyjątek stanowią wyniki otrzymane dla wariantu 3. Przebiegi przyspieszenia w tym przypadku narastają mniej dynamicznie w porównaniu do pozostałych wariantów obliczeniowych i posiadają najmniejsze wartości pomimo że, epicentrum wybuchu znajduje się bliżej okrętu niż w wariacie 2.

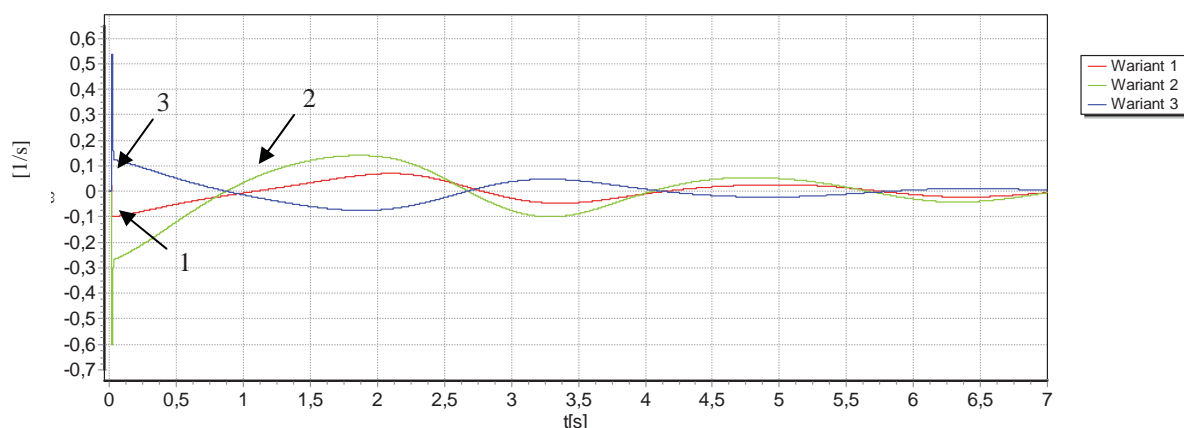


Rys. 7. Przemieszczenia rotacyjne okrętu po detonacji podwodnego ładunku wybuchowego
 Fig. 7. Angular move of the ship after underwater explosion

Analizując wykresy na rysunku 7. zauważymy, że największe przemieszczenia rotacyjne okrętu mają miejsce w przypadku umieszczenia ładunku pod jego rufową częścią. Wynik taki jest rezultatem przegłębienia okrętu na rufę oraz jej kształtu. Fala ciśnienia ma tutaj kontakt z większą powierzchnią poszycia okrętu, a ponadto kierunki normalnych do powierzchni elementów siatki są prawie pionowo zorientowane w stosunku płaszczyzny wody spokojnej. W efekcie przemieszczenia rotacyjne okrętu po detonacji ładunku pod jego rufą są największe.

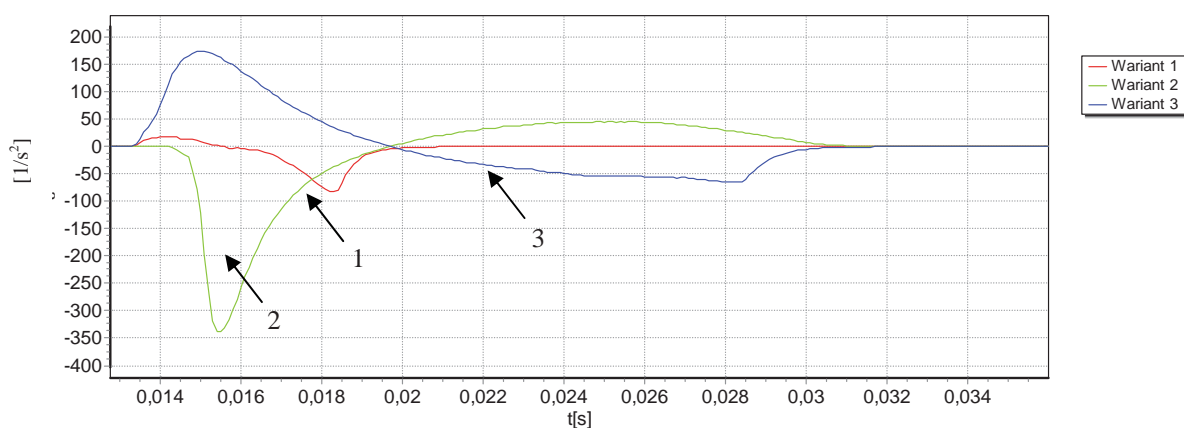
Porównując przebiegi prędkości kątowych przedstawionych na rysunku 8. zauważymy, że wykres dla wariantu 2 jest prawie symetrycznym odbiciem względem osi czasu wykresu otrzymanego dla wariantu 3. Występujące w początkowym okresie ruchu skoki wartości prędkości wynikają ze zmiany kierunku działania wypadkowego momentu sił od fali ciśnienia. Zmiana ta następuje w miarę przemieszczenia się frontu fali od dziobu do rufy okrętu lub odwrotnie.

Dodatnie wartości przyspieszenia kąowego w pierwszych milisekundach wynikają z początkowego kontaktu fali ciśnienia z dziobową częścią kadłuba, a następnie rufową.



Rys. 8. Zmiany prędkości kąowej okrętu po detonacji podwodnego ładunku wybuchowego
Fig. 8. Angular velocity of the ship after underwater explosion

Znak wypadkowego momentu od sił ciśnienia powstałego po detonacji ładunku, w pierwszych milisekundach ruchu okrętu ma decydujący wpływ na kierunek jego ruchu obrotowego. Takie wnioski możemy wyciągnąć na podstawie wyników otrzymanych dla wariantów 2 i 3 przedstawionych na rysunku 9. Odstępstwem w tym przypadku są wyniki dla wariantu 1, gdyż początkowo ruchu obrotowy okrętu odbywa się przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara, a po kilku milisekundach zgodnie z nimi.



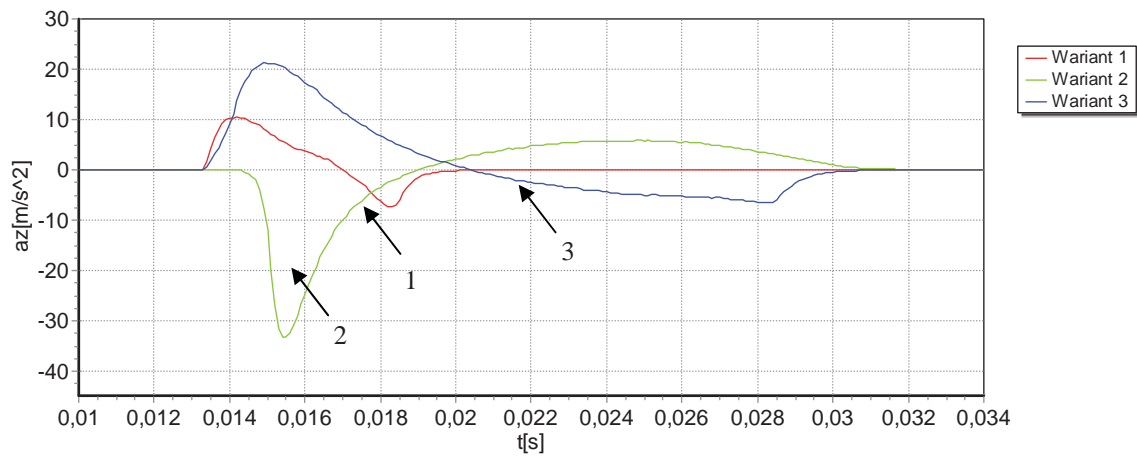
Rys. 9. Przyspieszenie kąowe okrętu typu 207 M
Fig. 9. Angular acceleration of the ship type 207 M

Szerszą analizę zagadnienia umożliwia przedstawiona na wykresach symulacja przyspieszenia obliczonego w dwóch miejscach okrętu newralgicznych dla jego bezpieczeństwa. Pierwszym z nich jest stanowisko dowodzenia okrętem, które znajduje się na pokładzie pokładówki.

W obliczeniach uwzględniono podatność konstrukcji okrętu za pomocą współczynnika określonego na podstawie wyników pomiarów przedstawionych dla innej jednostki wojennej [8]. Dla wyżej położonych pokładów amplituda przyspieszenia jest nawet kilkudziesięciokrotnie mniejsza od wartości występujących na dnie okrętu. Charakter zmian przyspieszenia jest niemal identyczny z kąowym przyspieszeniem okrętu. Przyspieszenie prawie $35 \text{ [m/s}^2\text{]}$ może być niebezpieczne dla sztywno zamocowanych urządzeń.

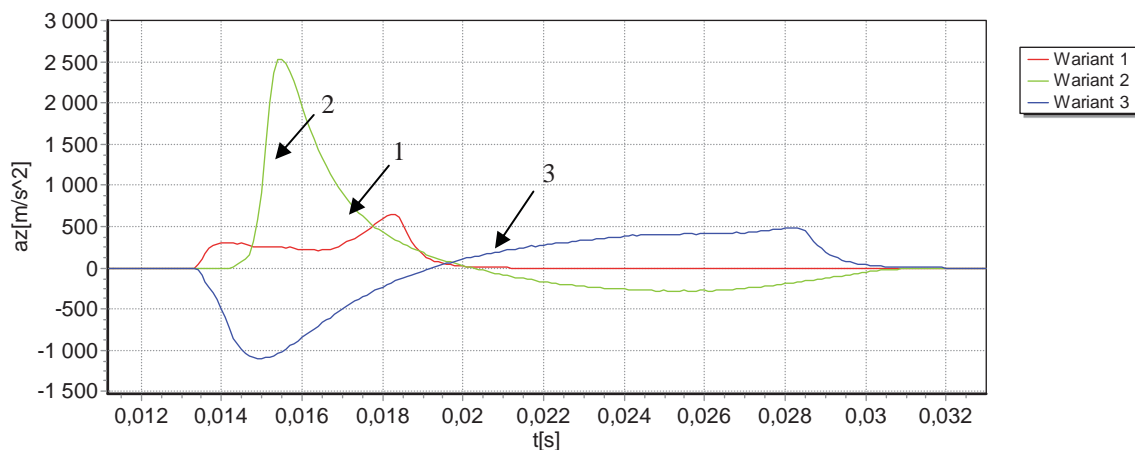
Wartości przyspieszeń obliczonych dla łożyska linii wałów przedstawiono na rysunku 11. Elementy te należą do grupy urządzeń najbardziej narażonych na uszkodzenia, gdyż

znajdują się najbliżej dna okrętu, z którym fala ciśnienia ma pierwszy kontakt. Największe wartości przyspieszenia na łożysku wału wystąpiły w drugim wariancie obliczeniowym.



Rys. 10. Pionowe przyspieszenie na stanowisku dowodzenia okrętem
 Fig. 10. Vertical acceleration on the captain's bridge

Ładunek w tym przypadku znajduje się w okolicach rufowej części okrętu. Po czasie około 6 milisekund następuje zmiana znaku przyspieszenia na przeciwny. Takie działanie ma bardziej destrukcyjny wpływ niż obciążenie jednokierunkowe. Zmiana kierunku działania obciążenia wynika z przemieszczania się fali ciśnienia wzdłuż osi x, tzn. kierunku ruchu obrotowego okrętu ulega odwróceniu.



Rys. 11. Pionowe przyspieszenie łożyska wału śrubowego
 Fig. 11. Vertical acceleration of the stern tube bearing

9. Wnioski

Przeprowadzona analiza parametrów ruchu okrętu oraz wartości przyspieszeń w wybranych miejscach okrętu umożliwia ocenę poprawności opracowanego algorytmu obliczeniowego od strony numerycznej oraz określenie charakteru obciążenia, które może oddziaływać na zamontowane na okręcie urządzenia.

Ruchu okrętu wywołany falą ciśnienia od podwodnego wybuchu zależy przede wszystkim od położenia ładunku wybuchowego w stosunku do jednostki pływającej. Reguła ta nie potwierdza

się w przypadku znacznych różnic w ukształtowaniu podwodnej części okrętu (dziób i rufa) ze względu na działanie fali ciśnienia na poszycie kadłuba okrętu pod kątem ostrym.

Oddziaływanie fali ciśnienia od niekontaktowych wybuchów podwodnych objawia się w postaci krótkotrwałych, intensywnych obciążeń dynamicznych, które mogą skutkować w postaci uszkodzeń mechanizmów i urządzeń okrętowych.

Obserwowany z perspektywy czasu oscylacyjny ruch okrętu rozpoczyna się relatywnie późno w stosunku do czasu pokonania długości okrętu przez falę ciśnienia po detonacji ładunku wybuchowego.

Literatura

- [1] Brebbia, K., Telles, Ż., Wrobel, L., *Metody granicznych elementow*, Izdatelstwo Mir, Moskwa 1987.
- [2] Burczyński, T., *Metoda elementów brzegowych w mechanice*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.
- [3] Cole, R. H., *Underwater Explosions*, Princeton University Press, Princeton 1948.
- [4] Dobrociński, S., *Stabilność rozwiązań zagadnień odporności udarowej konstrukcji*, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
- [5] Klatka, N., *Konstrukcje obron biernych Cz. IA i IB*, WSW, Gdynia, 1985.
- [6] Pawłędzio, A., *Metoda wyznaczania obciążeń udarowych mechanizmów okrętowych*, XXVI Sympozjum Siłowni Okrętowych, Gdynia, Zeszyty Naukowe Nr 162K/2, 2005.
- [7] Powierża, Z., *Wytrzymałość ogólna kadłuba okrętu przy niekontaktowych wybuchach podwodnych*, Zeszyty Naukowe Gdynia, 1991.
- [8] Rich, H.L., *Effects of underwater explosions on shipboard equipment*, Bureau of Ships Journal, vol. 8, nr 4, 1959.
- [9] Zębaty, M., Chmielewski, B., *Podstawy mechaniki budowli*, Arkady, Warszawa 1998.

This research work was financed from funds allocated to science in years 2006/2007 as a research project.