

Grzegorz Rutkowski
Akademia Morska w Gdyni

**WYKORZYSTANIE
PRZESTRZENNEGO MODELU DOMENY
DO OCENY BEZPIECZEŃSTWA NAWIGACYJNEGO
KONTENEROWCÓW OCEANICZNYCH
KLASY PS, TAKICH JAK „EMMA MAERSK”,
PODCZAS MANEWRÓW PODCHODZENIA
DO TERMINALU DTC GDAŃSK PORT PÓŁNOCNY**

STRESZCZENIE

W artykule zaproponowano sposób oceny bezpieczeństwa żeglugi (ryzyka nawigacyjnego) kontenerowców klasy PS, takich jak „Emma Maersk”, w akwenie ograniczonym Zatoki Gdańskiej z wykorzystaniem przestrzennego modelu domeny statku. Istotą proponowanych w pracy metod jest systemowe ujęcie eksploatacji statku morskiego w aspekcie oceny jego bezpieczeństwa podczas manewrów podchodzenia do terminalu kontenerowego DTC Gdańsk Port przy działaniu różnych zakłóceń zewnętrznych.

Słowa kluczowe:

bezpieczeństwo żeglugi, bezpieczeństwo nawigacyjne, manewrowanie statkiem, rezerwa nawigacyjna głębokości, zapas wody pod stępką, domena statku, ryzyko nawigacyjne, ryzyko kolizji, przeszkoda nawigacyjna, kontenerowiec, terminal, DCT Gdańsk.

WSTĘP

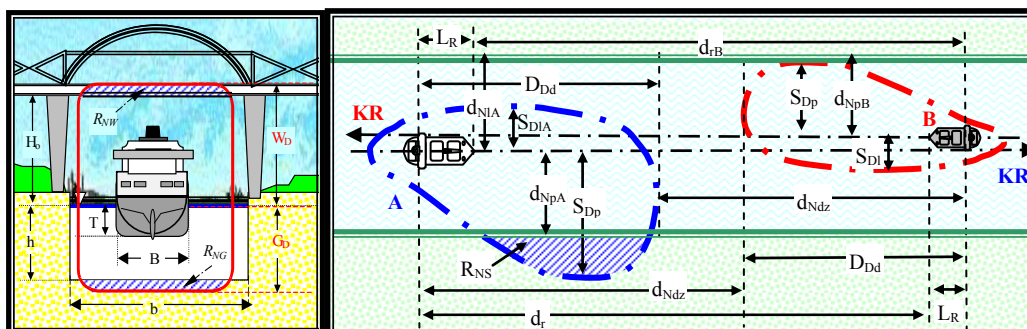
Istnieje wiele kryteriów oceny bezpieczeństwa nawigacyjnego statków manewrujących w akwenach ograniczonych, przy czym nie są one jednoznacznie określone, przez co wyodrębnienie akwenów trudnych pod względem nawigacyjnym (generujących duże ryzyko nawigacyjne) nie jest proste i jednolite [4].

W artykule przedstawiono koncepcję jednolitego (o ile to możliwe) systemu bezpieczeństwa transportu morskiego w akwencie ograniczonym w zależności od przyjętego marginesu bezpieczeństwa określonego przez zarys trójwymiarowej domeny statku [6].

Ocenę ryzyka nawigacyjnego dokonano dla kontenerowców klasy PS, takich jak „Emma Maersk” czy „Eleonora Maersk”, serwisu dalekowschodniego Azja — Europa (AE10) przewidzianych do obsługi w terminalu kontenerowym DCT Gdańsk Port Północny. Oceny ryzyka dokonano przy działaniu różnych zakłóceń zewnętrznych (przeciętnych i ekstremalnych) wzdłuż eksploatowanego toru wodnego wschodniego na Zatoce Gdańskiej przy wykorzystaniu przestrzennego modelu domeny [6], [7].

OCENA RYZYKA NAWIGACYJNEGO STATKÓW MANEWRUJĄCYCH W AKWENACH OGRANICZONYCH

Do analizy ryzyka nawigacyjnego w akwencie ograniczonym posłużymy się definicją domeny statku [6], definicją ryzyka nawigacyjnego [7] oraz wzorami uproszczonymi (za [6]) na parametry domeny statku (rys. 1.: jej głębokość G_D , wysokość W_D , długość D_D i szerokość S_D). Następnie na podstawie powyższych informacji, wykorzystując model przestrzenny domeny statku (znając jej parametry), podejmiemy próbę określenia wartości ryzyka nawigacyjnego w płaszczyźnie pionowej (R_{NG} , R_{NW}) oraz poziomej (R_{NDdz} , R_{NDR} , R_{NSp} i R_{NSI}) dla kontenerowców klasy PS, takich jak „Emma Maersk” czy „Eleonora Maersk”, nawigujących na Zatoce Gdańskiej w stanie załadowanym oraz pod balastem przy działaniu różnych zakłóceń zewnętrznych.



Rys. 1. Zobrazowanie ryzyka nawigacyjnego statku przechodzącego:
a) płytkim kanałem pod mostem; b) wąskim torem wodnym podczas sytuacji spotkania z innym statkiem

Źródło: opracowanie własne.

Z definicji domeny [6] (z jej cechy wyłączności) wynika, że statek będzie bezpieczny, dopóki w obrębie swojej domeny będzie on jedynym obiektem ruchomym lub stałym, stanowiącym (z nawigacyjnego punktu widzenia) jedyne źródło mogące generować tam zagrożenie (w naszych rozważaniach pomija się możliwość zaistnienia innych wypadków morskich niż te, które związane są bezpośrednio z ruchem statku i jego nawigacją).

W odniesieniu do płaszczyzny pionowej lokalnego (statkowego) układu odniesienia, liczonej w dół od środka tego układu, można jednoznacznie stwierdzić, że statek pozostanie bezpieczny dopóki wartość głębokości jego domeny G_D będzie mniejsza od rzeczywistej głębokości akwenu h (rys. 1.). A zatem składową R_{NG} ryzyka nawigacyjnego R_N (nazwijmy ją składową pionową ryzyka nawigacyjnego od zachowania rezerwy głębokości lub krócej — ryzykiem od zachowania głębokości) można będzie przedstawić za pomocą następującej zależności:

$$R_{NG} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } h > G_D \\ 0 \div 1 & \text{gdy } T_{max} < h \leq G_D \\ 1 & \text{gdy } h \leq T_{max} \end{cases} \quad (1)$$

Z definicji ryzyka nawigacyjnego [7] wiemy, że jeżeli wartość ryzyka pochodzącego od czynników A_i (obiektów) wynosi 0, oznacza to pełne bezpieczeństwo nawigacyjne względem tych czynników (obiektów). Zatem zgodnie z zależnością (1) warunek $h > G_D$ może być definiowany jako gwarancja bezpiecznej żeglugi statku względem obiektów podwodnych umieszczonych na głębokościach mniejszej od h . Jeżeli głębokość akwenu h okazałaby się jednak mniejsza lub równa zanurzeniu statku ($h \leq T_{max}$), wówczas zgodnie z zależnością (1) realizacja podróży morskiej może okazać się niemożliwa¹ lub wysoce niebezpieczna (ryzykowna). Zaistnienie powyższej sytuacji sprawi zatem, że wartość ryzyka nawigacyjnego R_{NG} wzrośnie do jedności, a to można interpretować jako pewne (stuprocentowe) prawdopodobieństwo zaistnienia awarii morskiej (wypadku) wskutek uderzenia (kontaktu) z podwodną przeszkodą nawigacyjną umieszczoną na głębokości mniejszej lub równej h .

Po przeprowadzeniu dalszej analizy logicznej dla przedstawionej powyżej sytuacji można wysunąć wniosek, że dla głębokości h ograniczonych przedziałem: $T_{max} < h \leq G_D$ ryzyko nawigacyjne R_{NG} będzie przybierać wartości pośrednie z przedziału $R_{NG} \in \langle 0,1 \rangle$, co jasno wyraża część środkowa zależności (1). Wzór ogólny

¹ W rozważaniach pomija się możliwość zmniejszenia zanurzenia statku na przykład przez jego odbalastowanie.

na wartość ryzyka R_{NG} dla argumentów h z tak opisanego przedziału ($T_{\max} < h \leq G_D$) można wyrazić wzorem:

$$R_{NG} = \frac{G_D - h}{G_D - T_{\max}} \quad (2)$$

Analizę ryzyka nawigacyjnego względem obiektów nadwodnych (zawieszonych nad wodą) można przeprowadzić w sposób analogiczny jak to uczyniono powyżej dla obiektów podwodnych (rys. 1.). Składową ryzyka nawigacyjnego R_{NW} , nazwijmy ją składową pionową ryzyka nawigacyjnego od zachowania rezerwy wysokości lub krócej — ryzykiem od zachowania wysokości, można przedstawić zależnością:

$$R_{NW} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } H_o > W_D \\ \frac{W_D - H_o}{W_D - H_N} & \text{gdy } H_N < H_o \leq W_D, \\ 1 & \text{gdy } H_o \leq H_N \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

H_o — wysokość zawieszenia obiektu nad wodą (prześwit wody pod mostem) [m];

H_N — wysokość nadwodnej części kadłuba [m].

Analogicznie w płaszczyźnie poziomej, składowe R_{NDdz} i R_{NDr} ryzyka nawigacyjnego R_N (nazwijmy je składowymi poziomymi ryzyka nawigacyjnego od zachowania rezerwy długości lub odległości bezpiecznej odpowiednio przed dziobem i za rufą statku, lub krócej — ryzykiem od zachowania bezpiecznej odległości) można przedstawić za pomocą następujących równań:

$$R_{NDdz} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } d_{Ndz} > D_{Ddz} \\ \frac{D_{Ddz} - d_{Ndz}}{D_{Ddz} - L_{RD}} & \text{gdy } L_{RD} < d_{Ndz} \leq D_{Ddz} \\ 1 & \text{gdy } d_{Ndz} \leq L_{Rd} \end{cases} \quad (4)$$

oraz

$$R_{NDr} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } d_{Nr} > D_{Dr} \\ \frac{D_{Dr} - d_{Nr}}{D_{Dr} - (L - L_{RD})} & \text{gdy } (L - L_{RD}) < d_{Nr} \leq D_{Dr} \\ 1 & \text{gdy } d_{Nr} \leq (L - L_{Rd}) \end{cases} \quad (5)$$

Interpretacja wzorów (4) i (5) będzie przebiegać podobnie jak uczyniono to przy omawianiu pionowej rezerwy nawigacyjnej statku. Stąd zgodnie z zależnością (4) warunek $d_{Ndz} > D_{Ddz}$ oraz zgodnie z zależnością (5) warunek $d_{Nr} > D_{Dr}$ będą gwarancją bezpiecznej żeglugi statku względem obiektów wykrytych odpowiednio przed dziobem i za rufą statku. Z analizy wzoru (4) można ustalić również, iż wartość ryzyka nawigacyjnego R_{NDdz} zawarta w przedziale $R_{NDdz} \in (0,1)$ pojawi się dopiero wówczas, gdy odległość d_{Ndz} okaże się równa lub mniejsza od długości domeny D_{Ddz} . Przy czym zaistnienie warunku $d_{Ndz} < L_{RD}$ oznaczać będzie już zaistnienie kolizji lub prawdopodobieństwo jej zaistnienia (sytuacja wątpliwa dotyczy tylko obiektów ruchomych mających własną domenę, o której wartość zmniejszono parametr d_{Ndz}).

Analogicznie wyróżniając składowe ryzyka nawigacyjnego R_{NS} określone względem obiektów położonych po lewej R_{NSl} i po prawej R_{NSp} burcie statku (nazwijmy je składowymi ryzyka nawigacyjnego od zachowania rezerwy szerokości odpowiednio po lewej i prawej burcie statku lub krócej — ryzykiem od zachowania szerokości), można zapisać następujące równania:

$$R_{NSl} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } d_{NI} > S_{DI} \\ \frac{S_{DI} - d_{NI}}{S_{DI} - 0,5 B} & \text{gdy } \frac{B}{2} < d_{NI} \leq S_{DI} \\ 1 & \text{gdy } d_{NI} \leq \frac{B}{2} \end{cases} \quad (6)$$

oraz

$$R_{NSp} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } d_{Np} > S_{Dp} \\ \frac{S_{Dp} - d_{Np}}{S_{Dp} - 0,5 B} & \text{gdy } \frac{B}{2} < d_{Np} \leq S_{Dp} \\ 1 & \text{gdy } d_{Np} \leq \frac{B}{2} \end{cases} \quad (7)$$

Analizę ryzyka nawigacyjnego przeprowadzimy dla kontenerowców klasy PS, takich jak „Emma Maersk” i „Eleonora Maersk”, manewrujących na Zatoce Gdańskiej na wyznaczonym torze wodnym wschodnim prowadzącym do terminalu DCT Gdańsk Port Północny, czyli w akwenie ograniczonym szerokością i głębokością podczas panowania przeciętnych i ekstremalnych warunków hydrometeorologicznych oraz innych zakłóceń ruchu.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz długoletnich obserwacji prowadzonych na Zatoce Gdańskiej [1], [3] ustalono, że do dalszych analiz ryzyka nawigacyjnego będzie można przyjąć warunki nawigacyjne i hydrometeorologiczne opisane w tabeli 1. jako warunki przeciętne i ekstremalne, podane z pewnym akceptowalnym błędem, uznane za warunki reprezentatywne dla badanego rejonu Zatoki Gdańskiej.

Tabela 1. Określenie przeciętnych i ekstremalnych warunków nawigacyjnych panujących na głębokowodnym torze wodnym wschodnim (o kierunku $253,6^{\circ}$ – $073,6^{\circ}$, szerokości $b = 350$ m, głębokości $h = 17$ m) na podejściu do terminalu DCT Gdańsk Port Północny

Warunki przeciętne	Warunki ekstremalne
widzialność dobra, morze spokojne $h_f \leq 1$ m, wiatr umiarkowany 3–4°B, prąd o prędkości $v_p \leq 1,0$ w i kierunku 090° , pionowe oscylacje lustra wody określone względem zera mapy (MSL) nieprzekraczające $\pm 0,10$ m ($h = 16,90$ m), gęstość wody $\gamma = 1,00525$ g/cm ³ , dryf statku nieprzekraczający $\pm 1^{\circ}$, maksymalne myszkowanie do $\pm 1^{\circ}$, przechył boczny α do $\pm 1^{\circ}$	widzialność umiarkowana, miejscami ograniczona, morze nieco wzburzone ($h_f \approx 3$ m), wiatr do 6–7°B, prąd o prędkości $v_p \approx 3$ w i kierunku prostopadłym do osi toru (344°), pionowe oscylacje lustra wody określone względem zera mapy (MSL) do $\pm 0,60$ m ($h = 16,40$ m), gęstość wody $\gamma = 1,00250$ g/cm ³ , dryf statku do $\pm 2^{\circ}$, myszkowanie do $\pm 2^{\circ}$, przechył boczny α do $\pm 5^{\circ}$

Źródło: materiały Biura Hydrograficznego Marynarki Wojennej RP i Urzędu Morskiego w Gdyni, locje Bałtyku, meldunki służby VTS Zatoka Gdańska.

OCENA RYZYKA NAWIGACYJNEGO KONTENEROWCÓW KLASY PS TAKICH JAK „EMMA MAERSK”

Kontenerowce (pojemnikowce) klasy PS, takie jak „Emma Maersk”, mają nominalną ładowność rzędu 15000 TEU. Wyznaczono je do obsługi portu DCT Gdańsk Port Północny w ramach dalekowschodniego serwisu Azja — Europa (AE10) dla światowego operatora Maersk Line. Są to jednocześnie największe kontenerowce obsługujące porty w akwenie Morza Bałtyckiego.

Kontenerowiec „Emma Maersk” (IMO 9321483) charakteryzuje się długością całkowitą kadłuba $L = 397,60$ m, szerokością kadłuba $B = 56,40$ m, zanurzeniem maksymalnym $T_{max} = 16,02$ m (obsługa terminalu DCT Gdańsk będzie odbywała się przy zredukowanym zanurzeniu $T_{zr} = 14,50$ m), wysokością całkowitą $H_c = 76,50$ m, nośnością DWT = 156907 t, wypornością $D = 218788$ t, masą statku pustego równą 61881 t, masą segregowanych balastów równą 60338 t, tonażem pojemnościowym brutto GT = 170794, tonażem pojemnościowym netto NRT = 55396 oraz maksymalną ładownością kontenerów 14770 TEU. „Emma Maersk” wyposażona

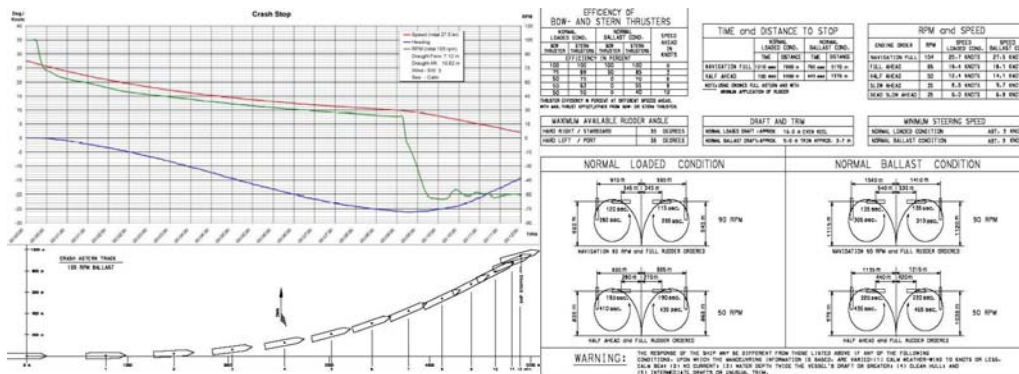
została w 80 MW siłownię Wartsila Sulzer 14RT-Flex96c, która dostarcza moc rzędu 80080 kW (108877 KM) MCR/68 068 kW (92545 KM) CSR, pięć generatorów prądowców opartych na silnikach wysokoprężnych MaK 9M32C o mocy po 4140 kW każdy oraz zespół prądowców oparty na turbinie parowo-gazowej (zasilany gazami SG) o mocy 8500 kW. Statek ma stałą śrubę okrętową prawoskrętną o masie własnej rzędu 135 ton. Jednostka ta może uzyskać prędkość maksymalną rzędu $V_{max} = 27,5$ węzła (50,9 km/h). Prędkość eksploatacyjna wynosi jednak zwykle około $V_e = 24,50$ węzła (45,3 km/h). Dwa dziobowe i dwa rufowe stery strumieniowe firmy Rolls Royce, każdy ze śrubą nastawną o naporze do około 25 T, pomagają manewrować kolosem. Dziobowe stery umieszczone są odpowiednio 38,19 m oraz 44,44 m od pionu dziobowego, rufowe zaś 38,50 m oraz 44,72 m od pionu rufowego. Wszystkie stery umieszczone są na wysokości 2,77 m od stępki statku. W ciężkich warunkach pogodowych nadmierne kołysanie (i ewentualne szkody ładunkowe) można zredukować dzięki dwóm parom aktywnych stabilizatorów płetwowych (*Litton Sperry Fin Stabilizers*). Automatyka siłowniana monitoruje 8000 punktów generujących dane z czujników. Dzięki temu kolos ten może być obsadzony jedynie przez trzynastoosobową załogę. „Emma Maersk” ma dwie kotwice, każdą o wadze 29 ton z doczepionymi czternastoma szakłami łańcucha o łącznej długości 2 x 385 m.



Rys. 2. Kontenerowiec typu PS „Emma Maersk” przewidziany do obsługi terminalu DCT Gdańsk Port Północny w ramach serwisu AE10 Maersk Line łączącego Daleki Wschód z Europą Północną

Źródło: <http://www.maerskline.com>.

Parametry domeny statku obliczone według wytycznych zawartych w pracy [6] dla kontenerowca klasy PS „Emma Maersk” oraz jej siostrzanych statków „Elly Maersk”, „Evelyn Maersk”, „Eleonora Maersk”, „Estelle Maersk” oraz „Ebba Maersk” dla różnych nastaw prędkości statku oraz stanów jego załadowania zestawiono w tabeli 2.



Rys. 3. Charakterystyki manewrowe kontenerowca klasy PS „Emma Maersk” określone na podstawie prób morskich na morzu spokojnym (2°), bez prądu, przy słabym wietrze (do 10 w) na akwenu o głębokościach dwukrotnie większych od maksymalnego zanurzenia statku

Źródło: materiały wewnętrzne firmy Maersk „Ship Handling 8.02.01 Ship Manoeuvrability L203-L210”.

Tabela 2. Parametry domeny statku określone dla kontenerowca klasy PS „Emma Maersk” dla różnych nastaw silnika głównego i stanu załadowania statku na głębokowodnym torze podejściowym wschodnim do terminalu DCT Gdańsk

TOR GŁĘBOKOWODNY WSCHODNI 253,6°–073,6° (parametry toru: $b = 350$ m i $h = 17,0$ m; $KR = 254^\circ$)														
NASTAWA MASZYNY	STATEK ZAŁADOWANY ($D = 156907$ t) $T_D = 14,50$ m; $T_R = 14,50$ m; $T_{max} = 14,99$ m przy $\alpha \cong \pm 1^\circ$ i $16,90$ m przy $\alpha \cong \pm 5^\circ$							STATEK POD BALASTEM ($D = 122219$ t) $T_D = 7,10$ m; $T_R = 10,80$ m; $T_{max} = 11,29$ m przy $\alpha \cong \pm 1^\circ$ i $13,22$ m przy $\alpha \cong \pm 5^\circ$						
	V [w]	G_D [m]	W_D [m]	D_{Ddz} [m]	D_{Dr} [m]	S_{Dp} [m]	S_{DI} [m]	V [w]	G_D [m]	W_D [m]	D_{Ddz} [m]	D_{Dr} [m]	S_{Dp} [m]	S_{DI} [m]
Warunki przejścia przeciętne: widzialność dobra, morze spokojne $h_f \leq 1$ m, wiatr umiarkowany 3–4°B, prąd o prędkości $v_p \leq 1,0$ w i kierunku 090°, pionowe oscylacje lustra wody określone względem zera mapy (MSL) nieprzekraczające $\pm 0,10$ m ($h = 16,90$ m), gęstość wody $\gamma = 1,00525$ g/cm ³ , dryf statku nieprzekraczający $\pm 1^\circ$, maksymalne myszskowanie do $\pm 1^\circ$, przechył boczny α do $\pm 1^\circ$														
CNM	25,7	22,32	68,18	9037	1171	232	1741	27,5	17,88	71,14	6215	978	170	1170
CN	16,4	19,18	65,04	5644	861	181	1539	18,1	15,09	68,37	3937	744	141	1041
PN	12,4	18,28	64,14	3680	713	156	1148	14,1	14,27	67,53	2650	614	120	795
WN	8,6	17,68	63,54	1416	458	98	282	9,7	13,63	66,89	1100	427	85	210
BWN	6,0	17,40	63,26	1061	365	87	197	6,8	13,34	66,60	842	347	77	152
STOP	0,0	17,15	63,01	272	205	114	114	0,0	13,08	66,34	272	205	114	114
Ekstremalne warunki przejścia: widzialność umiarkowana, miejscami ograniczona, morze nieco wzburzone ($h_f \approx 3$ m), wiatr do 6–7°B, prąd o prędkości $v_p \approx 3$ w i kierunku prostopadłym do osi toru (344°), pionowe oscylacje lustra wody określone względem zera mapy (MSL) do $\pm 0,60$ m ($h = 16,40$ m), gęstość wody $\gamma = 1,00250$ g/cm ³ , dryf statku do $\pm 2^\circ$, myszskowanie do $\pm 2^\circ$, przechył boczny α do $\pm 5^\circ$														
CNM	25,7	26,39	67,11	8453	587	2017	3526	27,5	22,05	70,13	5851	615	1330	2330
CN	16,4	22,86	63,58	5226	444	1507	2865	18,1	18,84	66,92	3662	470	1057	1957
PN	12,4	21,85	62,57	3348	382	1245	2237	14,1	17,90	65,98	2445	408	848	1523
WN	8,6	21,17	61,89	1282	323	645	829	9,7	17,16	65,24	1014	340	491	616
BWN	6,0	20,85	61,57	980	283	500	610	6,8	16,82	64,90	790	296	400	475
STOP	0,0	20,57	61,29	257	191	271	271	0,0	16,52	64,60	257	191	271	271
UWAGA: przyjęto współczynniki: $n = 1,1$; $m = 1,0$; $k = 1,0$; $s_D = 1,0$; $s_S = 1,0$; $r_D = 1,0$; $r_S = 1,0$; $L = 397,60$ m; $\Delta L = 25$ m; $B = 56,40$ m; $AB = 25$ m; $L_{RD} = 232$ m; $t_r = 0,5^\circ$; $H_c = 76,5$ m; $p = 1,0$ dla statku załadowanego oraz dla statku pod balastem (ładunek nieszkodliwy); moc maszyny 80080 kW (108877HP), współ. pełnotliwości kadłuba: $\delta = 0,598$.														

Źródło: materiały wewnętrzne firmy Maersk „Ship Handling 8.02.01 Ship Manoeuvrability L203-L210”.

Tabela 3. Charakterystyki manewrowe kontenerowca klasy PS „Emma Maersk” określone na podstawie prób morskich zatrzymywania wymuszonego jednostki manewrem „Crash Stop” (CN-CW) przy morzu spokojnym (Calm sea) oraz wietrze SW 3°B

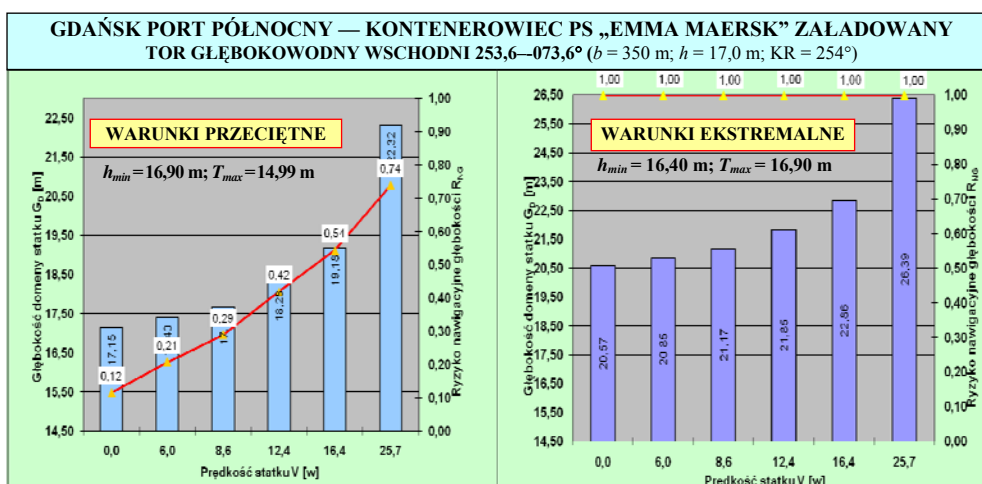
NASTAWA MASZINY / RPM [obr/min]		STATEK ZAŁADOWANY $T_D = 16,0$ m; $T_R = 16,0$ m, DWT = 156907				STATEK POD BALASTEM $T_D = 7,12$ m; $T_R = 10,82$ m ($D \approx 122219$ t)			
		V [w]	T_{stop} [min]	PC [m]	PB [m]	V [w]	T_{stop} [min]	PC [m]	PB [m]
CNM	104	25,7	20,17'	7800	1509	27,5	12,75'	5170	1000
CN	65	16,4	14,58'	4716	1358	18,1	9,75'	3126	900
PN	50	12,4	11,67'	2900	992	14,1	7,42'	1970	675
WN	35	8,6	5,03'	892	184	9,7	3,42'	607	125
BWN	25	6,0	3,25'	630	110	6,8	2,25'	428	75

Źródło: materiały wewnętrzne firmy Maersk „Ship Handling 8.02.01 Ship Manoeuvrability L203-L210”.

Analizę ryzyka nawigacyjnego R_N kontenerowca „Emma Maersk” opracowano na podstawie wzorów (1) — (7) oraz tabeli 2. Uzyskane w ten sposób wyniki przedstawione w postaci współczynników liczbowych od 0 do 1 będą odzwierciedlać skalę ryzyka nawigacyjnego, a co za tym idzie, w jasny sposób zdefiniują skalę bezpieczeństwa nawigacyjnego w akwenu. Bowiem im większe ryzyko nawigacyjne (współczynnik liczbowy zbliża się do jedności), tym mniejsze bezpieczeństwo nawigacyjne. Brak ryzyka nawigacyjnego (współczynnik liczbowy równy 0) oznacza pełne bezpieczeństwo nawigacyjne względem tych czynników. Ryzyko nawigacyjne określone w ten sposób można przedstawić również w postaci graficznej (patrz rys. 3–8), co znacznie ułatwia szybką analizę bezpieczeństwa nawigacyjnego w badanym akwenu.

Interpretacja uzyskanych wyników badań dotyczących oceny ryzyka nawigacyjnego kontenerowca „Emma Maersk” podczas manewrowania na torze wodnym wschodnim oraz przy podejściu do nabrzeża DCT Gdańsk Port Północny mogłaby przebiegać w taki sposób jak na rysunku 4.

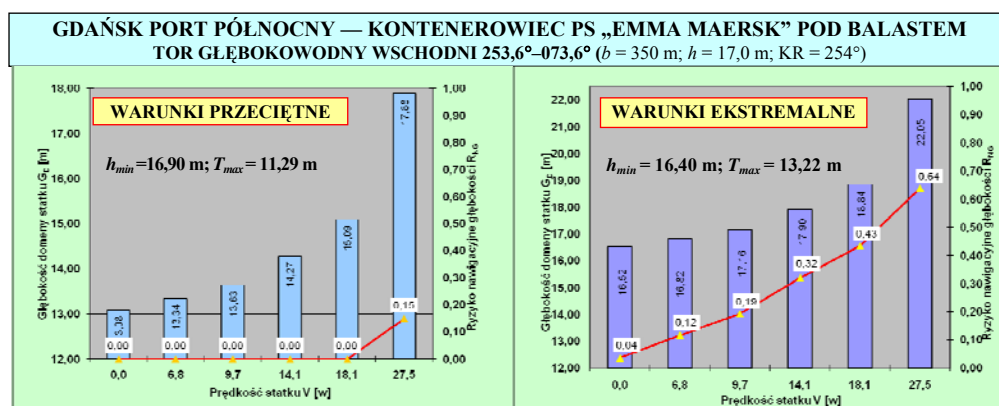
Ryzyko nawigacyjne R_{NG} dla statku „Emma Maersk” załadowanego do zanurzenia $T = 14,5$ m (czyli $T_{max} = 14,99$ m przy przechyłach bocznych $\alpha \cong \pm 1^\circ$ oraz 16,90 m przy $\alpha \cong \pm 5^\circ$) określone w płaszczyźnie pionowej względem najpłycej położonych obiektów podwodnych leżących w granicach wyznaczonej trasy przejścia na pogłębionym torze wodnym wschodnim ($h = 17,0$ m \pm 0,10 m), przy dobrych warunkach hydrometeorologicznych przybierać będzie od wartości 0,12 dla statku w dryfie do 0,74 dla statku płynącego z prędkością CNM = 25,7 węzła. Przy czym podążanie z prędkością BWN = 6,0 węzłów generować będzie ryzyko nawigacyjne R_{NG} na poziomie około 0,21, co może być interpretowane jako „swego rodzaju” 21% prawdopodobieństwo, że zaistnieje wypadek morski polegający na uderzeniu kadłubem statku o dno akwenu.



Rys. 4. Przebieg zależności funkcyjnej pomiędzy prędkością statku V , głębokością domeny G_D oraz ryzykiem nawigacyjnym R_{NG} określonym dla kontenerowca m/v „Emma Maersk” w stanie załadowanym dla różnych warunków pogodowych na torze wodnym wschodnim podczas podejścia do Portu Północnego DCT Gdańsk

Źródło: opracowanie własne.

Przy ekstremalnych warunkach hydrometeorologicznych ryzyko nawigacyjne R_{NG} na torze wodnym wschodnim ($h = 17,0$ m \pm 0,60 m) dla kontenerowca „Emma Maersk” w stanie załadowanym przyjmować będzie wartości równe 1, niezależnie od prędkości początkowej statku. W uproszczeniu można więc przyjąć, iż statek ten w stanie załadowanym podczas niedogodnych warunków hydrometeorologicznych (widzialność umiarkowana, miejscami ograniczona; morze nieco wzburzone, $h_f \approx 3$ m; wiatr powyżej $7^\circ B$; prąd o prędkości $v_p \approx 3$ w i kierunku prostopadłym do osi toru (344°); pionowe oscylacje lustra wody określone względem zera mapy (MSL) do $\pm 0,60$ m ($h_{min} = 16,40$ m); gęstość wody $\gamma = 1,00250$ g/cm³; dryf statku do $\pm 2^\circ$; myszkowanie do $\pm 2^\circ$; przechył boczny α do $\pm 5^\circ$) nie będzie możliwe. Dynamiczne oddziaływanie wiatru, prądu i fali na kadłub statku, przy awarii systemu stabilizacji przechyłów (*Fin Stabilizers*), spowodować może wystąpienie przechyłów bocznych do $\pm 5^\circ$, co przy szerokości kadłuba statku $B = 56,40$ m może spowodować wzrost jego zanurzenia początkowego z $T_1 = 14,50$ m do $T_2 = 16,90$ m. To natomiast przy dużej fali oraz pionowych oscylacjach lustra wody, które w ekstremalnych warunkach dochodzą do $\pm 0,60$ m względem zera mapy (MSL), fizycznie powodując obniżenie przyjętej głębokości akwenu z $h_1 = 17,0$ m do $h_2 = 16,40$ m, wykluczy nam możliwość prowadzenia bezpiecznej nawigacji przy panujących warunkach zewnętrznych.



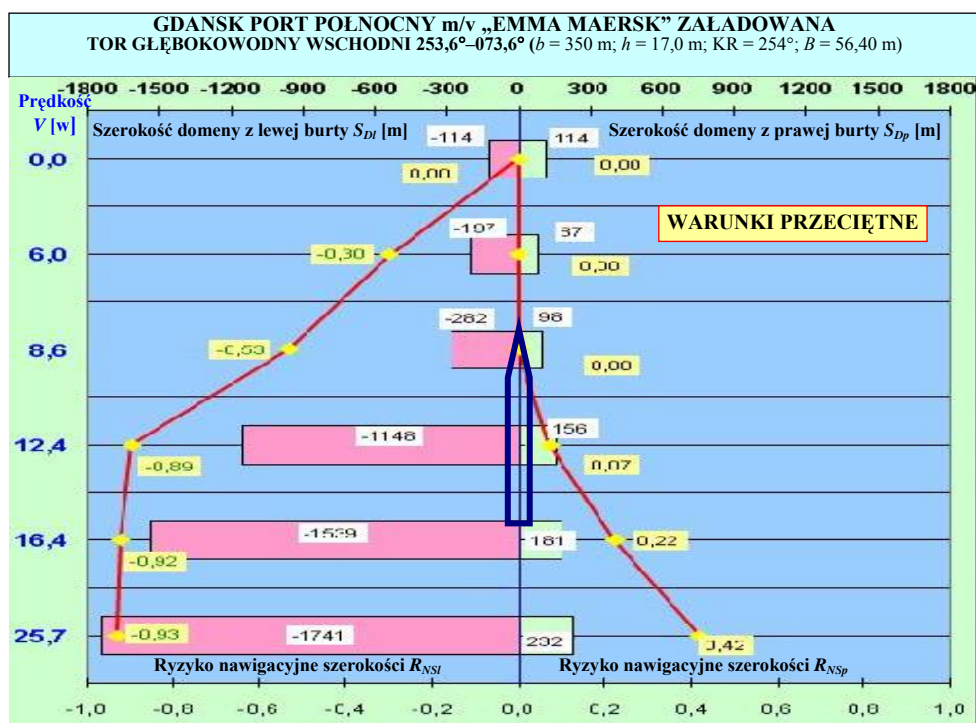
Rys. 5. Przebieg zależności funkcyjnej pomiędzy prędkością statku V , głębokością domeny G_D oraz ryzykiem nawigacyjnym R_{NG} określonym dla kontenerowca m/v „Emma Maersk” w stanie pod balastem dla różnych warunków pogodowych na torze wodnym wschodnim podczas podejścia do Portu Północnego DCT Gdańsk

Źródło: opracowanie własne.

Ryzyko nawigacyjne R_{NG} dla kontenerowców klasy PS takich jak „Emma Maersk” pod balastem przybierać będzie wartości zbliżone do 0,0 dla przeciętnych warunków przejścia i prędkości manewrowych mniejszych od 18 węzłów. Dla warunków ekstremalnych podczas dryfu ryzyko nawigacyjne R_{NG} kształtować się będzie na poziomie około 4%, przy prędkościach BWN = 6 węzłów na poziomie około 12% i będzie systematycznie wzrastać wraz ze wzrostem prędkości statku, aż do poziomu około 64% dla prędkości CNM.

Oznacza to, że przy spełnieniu wymienionych warunków kontenerowiec „Emma Maersk” może bezpiecznie nawigować na torze wodnym wschodnim w odniesieniu do przeszkód nawigacyjnych podwodnych, bowiem obliczone głębokości jego domeny są mniejsze od dostępnej głębokości akwenu, a to jest gwarancją bezpiecznej nawigacji wobec zatopionych obiektów, przeszkód podwodnych i innych niebezpieczeństw nawigacyjnych położonych w obrębie wyznaczonego toru wodnego (ryzyko nawigacyjne R_{NG} wynosi 0).

Analizę ryzyka nawigacyjnego R_{NW} pominiemy, bowiem na torze podejściowym do terminalu DCT Gdańsk Portu Północnego nie ma żadnych mostów oraz innych obiektów nadwodnych (np. linii energetycznych) mogących generować ryzyko nawigacyjne R_{NW} .

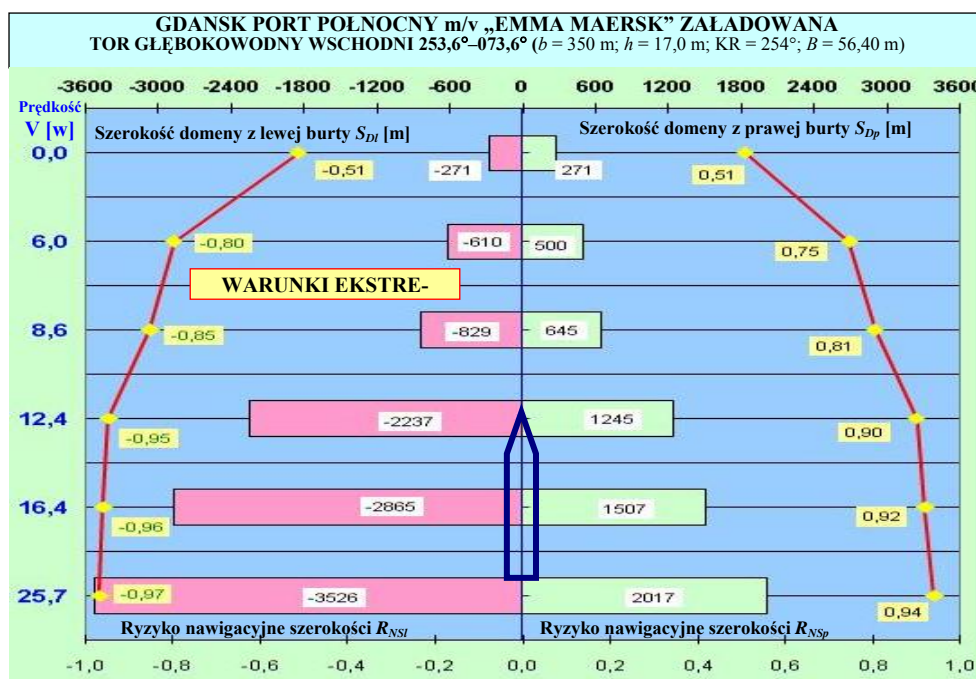


Rys. 6. Przebieg zależności funkcyjnej pomiędzy prędkością statku V , szerokością domeny S_D oraz ryzykiem nawigacyjnym R_{NS} określonych dla kontenerowca klasy PS „Emma Maersk” w stanie załadowanym na pogłębionym torze wodnym wschodnim podczas podejścia do Portu Północnego DCT Gdańsk przy przeciętnych warunkach zewnętrznych

Źródło: opracowanie własne.

Jeżeli podczas dalszej analizy przyjmiemy, że kontenerowiec „Emma Maersk” będzie podążał w osi toru wodnego z prędkością BWN ≈ 6 węzłów w odstępach separacyjnych pomiędzy statkami nie mniejszych niż $0,5$ Mm ($d_N = 926$ m), to wówczas ryzyko nawigacyjne R_{NDdz} określone w płaszczyźnie poziomej przed dziobem wzdłuż linii przejścia będzie przyjmować wartości zbliżone do zera dla stanu pod balastem niezależnie od panujących warunków zewnętrznych ($D_{Ddz\ max} = 842$ m $< d_N = 926$ m) oraz dla stanu załadowanego dla warunków ekstremalnych. Przy analizie parametrów długości domeny statku (za [6], [7]) wykorzystano charakterystyki manewrowe kontenerowca „Emma Maersk” ustalone podczas prób morskich (rys. 3. i tab. 3.), przyjmując poprawkę na błąd wzdłużny i poprzeczny pozycji obserwowanej statku na poziomie ± 25 m, półminutowy odstęp czasu na podjęcie odpowiedniej decyzji manewrowej oraz uwzględniając wpływ działania wiatru, prądu i płytkowodzia na

trajektorię ruchu statku podążającego torem wodnym wschodnim. Przyjęto, iż jednostki klasy PS powinny podążać w osi toru wodnego z minimalną prędkością sterowną na poziomie BWN od 3,5 do 6 węzłów. Dla tak określonych warunków nawigacyjnych ryzyko nawigacyjne R_{NDdz} dla stanu załadowanego przy prędkościach statku BWN oscylować będzie na poziomie od 7% dla warunków ekstremalnych do 16% dla warunków przeciętnych. Paradoksalnie dla warunków ekstremalnych na skutek zwiększonych oporów od wiatru, prądu i fali wymagana przestrzeń manewrowa jednostki do wytracenia prędkości manewrem CN-CW, czyli tzw. manewrem *Crash Stop*, będzie nieco mniejsza, stąd ryzyko ewentualnej kolizji z innym pływającym obiektem przed dziobem będzie mniejsze. Przy czym wraz ze wzrostem prędkości statku wzrasta wymagana droga i czas manewru awaryjnego zatrzymywania się, co automatycznie powoduje znaczny wzrost ryzyka nawigacyjnego R_{NDdz} , które dla dogodnych (przeciętnych) warunków przejścia z prędkością $WN = 8,6$ w oscylować będzie na poziomie 41%, a dla prędkości $PN = 12,4$ w wzrośnie aż do 80%.



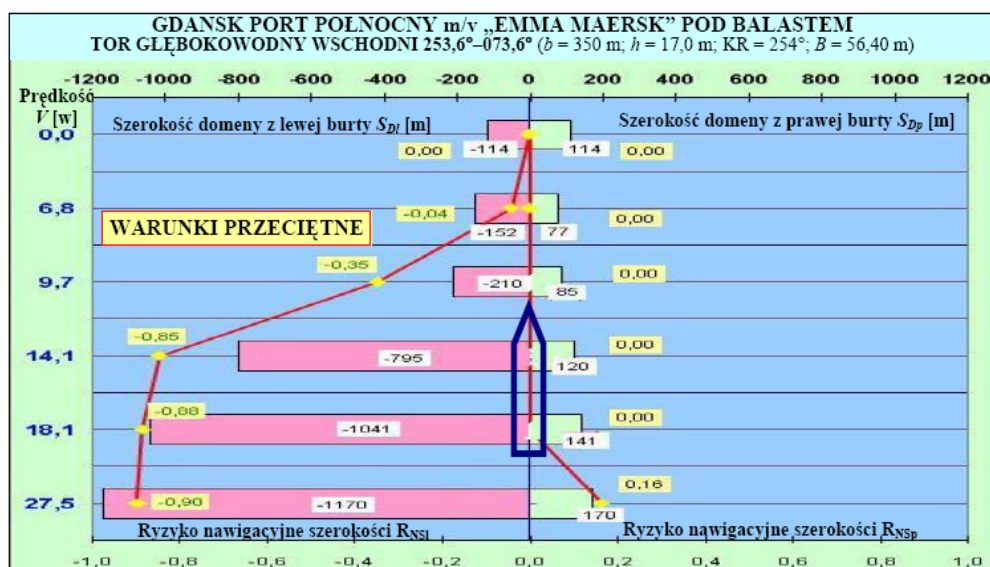
Rys. 7. Przebieg zależności funkcyjnej pomiędzy prędkością statku V , szerokością domeny S_D oraz ryzykiem nawigacyjnym R_{NS} określonych dla kontenerowca m/v „Emma Maersk” w stanie załadowanym na pogłębionym torze wodnym wschodnim podczas podejścia do Portu Północnego DCT Gdańsk przy ekstremalnych warunkach zewnętrznych

Źródło: opracowanie własne.

Analiza ryzyka nawigacyjnego R_{NSp} z prawej i R_{NSl} z lewej burty statku (rys. 6–9) w praktyce sprowadza się do analizy porównawczej parametrów domeny statku S_{Dp} i S_{Dl} z szerokością toru wodnego b_t , szerokością pasa wody żeglownej b_a oraz odległością do najbliższego niebezpieczeństwa d_N wykrytego odpowiednio po prawej i lewej burcie statku.

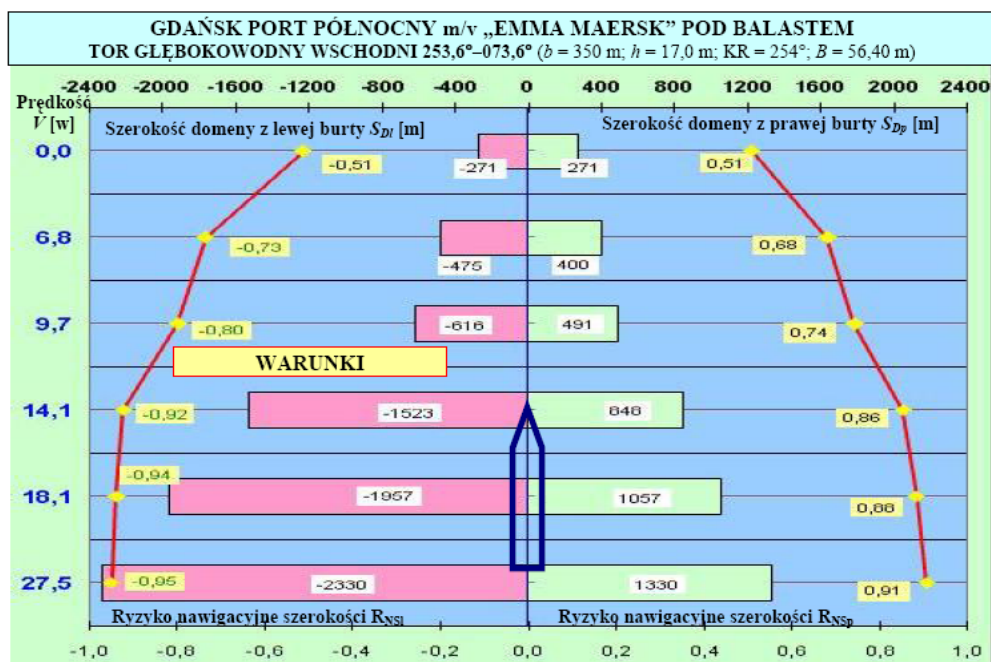
Jeżeli zatem w rozważaniach przyjmiemy, że statek będzie podążał torem wschodnim z prędkością BWN w osi toru wodnego o szerokości $b_t = 350$ m, to wówczas ryzyko nawigacyjne R_{NSp} określone w płaszczyźnie poziomej (rys. 6–9) po prawej burcie statku będzie przyjmować wartości zerowe dla warunków przeciętnych niezależnie od stanu załadowania oraz wartości od 0,68 do 0,75 dla warunków ekstremalnych. Przy czym wartość 0,68 ryzyko nawigacyjne R_{NSp} osiągnie dla stanu pod balastem i prędkości $V = 6,8$ w, a wartość 0,75 osiągnie dla stanu załadowanego i prędkości statku $V = 6$ w.

Ryzyko nawigacyjne R_{NSl} określone w sektorze po lewej burcie statku na torze wschodnim dla prędkości statku BWN przyjmować będzie wartości od 0,04 dla stanu pod balastem przy dogodnych warunkach przejścia (rys. 8., $S_{Dl} = 152$ m) do 0,80 dla stanu załadowanego i ekstremalnych warunków przejścia (rys. 7., $S_{Dl} = 610$ m). Dla stanu załadowanego i dogodnych (przeciętnych) warunków przejścia ryzyko to będzie oscylować w granicach wartości 0,30 (rys. 6., $S_{Dl} = 197$ m).



Rys. 8. Przebieg zależności funkcyjnej pomiędzy prędkością statku V , szerokością domeny S_D oraz ryzykiem nawigacyjnym R_{NS} określonych dla kontenerowca m/v „Emma Maersk” w stanie pod balastem na pogłębionym torze wodnym wschodnim podczas podejścia do Portu Północnego DCT Gdańsk przy przeciętnych warunkach zewnętrznych

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 9. Przebieg zależności funkcyjnej pomiędzy prędkością statku V , szerokością domeny S_D oraz ryzykiem nawigacyjnym R_{NS} określonych dla kontenerowca m/v „Emma Maersk” w stanie pod balastem na pogłębionym torze wodnym wschodnim podczas podejścia do Portu Północnego DCT Gdańsk przy ekstremalnych warunkach zewnętrznych

Źródło: opracowanie własne.

WNIOSKI

Z analizy ryzyka nawigacyjnego R_{NSp} i R_{NSl} wynika zatem, że kontenerowiec klasy PS, taki jak „Emma Maersk” oraz jego bliźniacze jednostki „Elly Maersk”, „Evelyn Maersk”, „Eleonora Maersk”, „Estelle Maersk” i „Ebba Maersk”, podążając w osi toru wodnego wschodniego ($b = 350$ m), nie mógłby bezpiecznie wykonać manewru cyrkulacji oraz manewru awaryjnego zatrzymywania się pracą silnika CW z naprzemiennym wychyleniem steru (*fishtailing*) bez możliwości jednoczesnego wyjścia poza granice wyznaczonego toru wodnego. Przejście takie torem wodnym powinno zatem odbywać się przy asyście holowników, manewry portowe zaś obowiązkowo z holownikami zamocowanymi przynajmniej na dziobie i rufie.

Optymalną prędkością jednostki zapewniającą dostateczną stateczność kursową przy minimalnym ryzyku nawigacyjnym R_N są prędkości rzędu od 3,5 do 6 węzłów. Dalsze zmniejszanie prędkości bez asysty holowników może spowodować nadmierny dryf oraz znos statku z toru wodnego, szczególnie przy silnym wietrze i prądzie działającym poprzecznie do wzdłużnej osi toru wodnego.

Prędkość żeglowną na torze podejściowym należy utrzymywać w przedziale od 3 do 6 węzłów, dla zachowania sterowności statku. Minimalna prędkość sterowa kontenerowców klasy PS, takich jak „Emma Maersk”, wynosi w stanie załadowanym oraz pod balastem 3 węzły (5,6 km/h). Prędkość żeglowna w przypadku utworzenia zespołu holowniczego na linach powinna również wynosić około 3 do 6 węzłów.

Przejście nawigacyjne kontenerowców klasy PS w stanie załadowanym torem wodnym wschodnim do terminalu kontenerowego DCT Gdańsk Port Północny będzie możliwe przy dobrych warunkach pogodowych (w zakresie widzialności do 1,0 Mm i dopuszczalnej siły wiatru do 7°B na wejście, 7°B na wyjście oraz rekomendowane 6°B na obrotnicy) oraz wielce ryzykowne przy warunkach zewnętrznych niedogodnych (tabela 1.).

Do obsługi statku przy sile wiatru 7°B i więcej należy zapewnić asystę holowników (w tym przynajmniej dwóch tzw. pędnikowców oraz dwóch tzw. ciągników) usytuowanych odpowiednio po dwa holowniki na dziobie (1+1) oraz dwa holowniki na rufie (1+1).

Jeżeli prognozy pogody przewidują wystąpienie wiatrów o sile 8°B i większych z kierunków NE i SE, statek powinien być wyprowadzony z portu z odpowiednim wyprzedzeniem (gdy warunki pogodowe pozwalają jeszcze na bezpieczne przeprowadzenie operacji wyprowadzenia) oraz nie powinien być wprowadzany do portu, jeżeli wprowadzanie było planowane. Decyzję taką podejmuje kapitan statku w porozumieniu z kapitanem portu na wniosek kierownictwa terminalu.

Z uwagi na dużą moc oraz rozmieszczenie pędników okrętowych jednostki, zwłaszcza rozmieszczenie sterów strumieniowych na kontenerowcu „Emma Maersk”, wszelkie manewry cumowania oraz odcumowywania od nabrzeża trzeba przeprowadzać z należytą ostrożnością przy współdziałaniu z taborem holowników, tak aby nadmierna praca pędników okrętowych nie powodowała erozji dna i podmywania nabrzeży w porcie. Docelowo zaleca się również, aby w przypadku obsługi w porcie DCT Gdańsk kontenerowców klasy PS rozważono możliwość zabezpieczenia dna akwenu oraz nabrzeży portowych na przykład poprzez wyłożenie dna akwenu brezentem.

Niniejsza analiza potwierdza również tezę, że model przestrzenny domeny statku można skutecznie wykorzystywać do analizy ryzyka nawigacyjnego w akwenu ograniczonym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Admiralty Sailing Directions*, 'Baltic Pilot', Vol. I, NP18, ed. 15/2009.
- [2] *Admiralty List of Radio Signals*, Vol. 6(2), NP286 (2), ed. 2009/2010.
- [3] Ekspertyzy wewnętrzne Urzędu Morskiego w Gdyni opracowane w lutym 2005 r. na potrzeby obsługi statków VLCC w Naftoporcie.
- [4] Holec M., Rutkowski G., *Próba zdefiniowania akwenu trudnego pod względem nawigacyjnym*, „Zeszyty Naukowe” WSM Gdynia, 1997, nr 32.
- [5] Nowicki A., *Wiedza o manewrowaniu statkami morskimi*, Wydawnictwo Trademar, Gdynia 1999.
- [6] Rutkowski G., *Modelowanie domeny statku w procesie manewrowania w ograniczonych akwenach*, Prace Naukowe „T”, PW, Wydział Transportu, Warszawa 2001.
- [7] Rutkowski G., *Zastosowanie modelu domeny do oceny bezpieczeństwa nawigacyjnego statków poruszających się w akwenach ograniczonych*, Prace Naukowe „T”, PW, Wydział Transportu, Warszawa 2001.
- [8] <http://www.ships-info.info/mer-emma-maersk.htm>.

ESTIMATING SAFETY OF SHIPPING IN THE RESTRICTED SEA AREAS BY MEANS OF THE THREE-DIMENSIONAL MODEL OF SHIP'S DOMAIN SPECIFIED FOR PS CLASS CONTAINER VESSELS TYPE 'EMMA MAERSK' WHILE APPROACHING DCT TERMINAL IN GDAŃSK PORT PÓLNOCNY

ABSTRACT

In this paper author presents the methods that can be used for estimating the safety of shipping (navigational risk) in the restricted sea areas of the Gulf of Gdańsk by means of a three-dimensional model of ship's domain specified for the PS Class container vessels 'Emma Maersk'. The essence of the method suggested in the thesis is the systematic approach to a sea vessel

operation in the aspect of estimating its safety while approaching DCT terminal in Gdańsk Port Północny in divergent exterior conditions.

Keywords:

safety of shipping, safety of navigation, ship handling, under keel clearance (UKC) ship's domain, risk of navigation, risk of collisions, navigational obstacle, container vessel, terminal, DCT Gdańsk.