

Przebudowa toru wodnego Świnoujście – Szczecin pogłębianego do 12,5 m – optymalizacja parametrów

Prof. dr hab. inż. kpt. ż.w. Stanisław Gucma

Centrum Inżynierii Ruchu Morskiego, Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny

Pogłębienie toru wodnego Świnoujście – Szczecin do 12,5 m wiąże się nie tylko z możliwością zwiększenia zanurzenia eksploatowanych tam statków, ale również ze zwiększeniem ich długości i szerokości. Powstał zatem problem określenia optymalnej szerokości toru wodnego Świnoujście – Szczecin przy jego pogłębieniu do 12,5 m w połączeniu z optymalizacją systemu nawigacyjnego tego akwenu.

Do rozwiązania tego problemu opracowano metodologię projektowania i optymalizacji parametrów przebudowywanego systemu dróg wodnych pogłębianych do zadanej głębokości. Metodologia ta na szczegółowym etapie projektowania wykorzystuje metodę CIRM (Centrum Inżynierii Ruchu Morskiego) opracowaną w Akademii Morskiej w Szczecinie oraz metodę symulacji komputerowej opartej na modelach nieautonomicznych czasu rzeczywistego. Metoda CIRM jest wykorzystywana do określania bezpiecznych szerokości prostoliniowych odcinków drogi wodnej, natomiast metoda symulacyjna jest wykorzystywana na jej zakrętach.

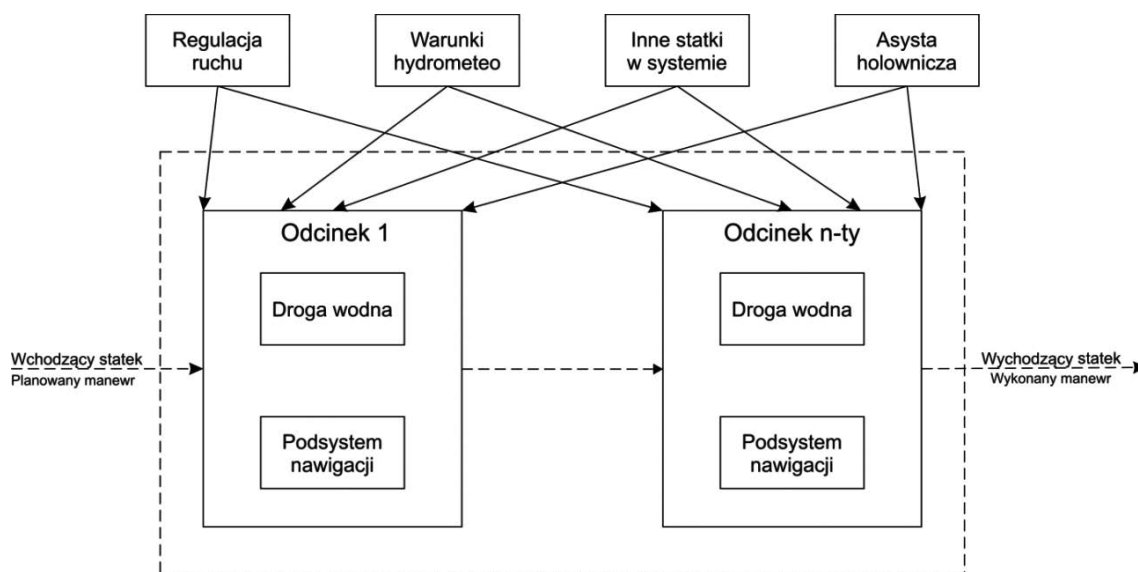
Projektowanie systemów morskich dróg wodnych należy do zadań inżynierii ruchu morskiego, w skład którego wchodzi określenie i optymalizacja parametrów systemu drogi wodnej, czyli:

- określenie i optymalizacja parametrów elementów tego system (podsystemy: droga wodna i nawigacyjny);
- określenie bezpiecznych warunków eksploatacji statków w tym systemie.

System morskich dróg wodnych w ujęciu inżynierii ruchu morskiego składa się z szeregu wyodrębnionych odcinków (n). W przypadku, gdy cały akwen, przez który przechodzą poszczególne odcinki morskiej drogi wodnej, jest objęty jednakowym systemem regulacji ruchu, model systemu dróg wodnych można uprościć do dwuelementowego. Wtedy, każdy z odcinków drogi wodnej składa się z dwóch podstawowych elementów [6]:

1. Podsystemu drogi wodnej.
2. Podsystemu nawigacji.

Uproszczony model systemu dróg wodnych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony model systemu dróg wodnych składający się z n odcinków

Warunki bezpiecznej eksploatacji statków na drodze wodnej opisuje wektor stanu warunków bezpiecznej eksploatacji „statku maksymalnego” na i -tym odcinku badanej drogi wodnej o postaci [3]:

$$\mathbf{W}_i = [t_{yp}, L_c, B, T, H_{st}, V, C, \mathbf{H}_i] \quad (1)$$

gdzie:

t_{yp} – rodzaj „statku maksymalnego”,
 L_c – długość całkowita „statku maksymalnego”,
 B – szerokość „statku maksymalnego”,
 T – zanurzenie „statku maksymalnego”,
 H_{st} – wysokość od poziomu wody do topu „statku maksymalnego”,
 V_i – dopuszczalna prędkość „statku maksymalnego” na i -tym odcinku drogi wodnej,
 C_i – asysta holownicza na i -tym odcinku drogi wodnej (wymagana ilość i uciąg holowników),
 $\mathbf{H}_i$ – wektor warunków hydrometeorologicznych dopuszczalnych dla „statku maksymalnego” na i -tym odcinku drogi wodnej.

System morskich dróg wodnych definiują parametry jego elementów (podsystemów). Dwa elementy systemu morskich dróg wodnych na poszczególnych jego odcinkach są funkcją wektora stanu warunków bezpiecznej eksploatacji „statku maksymalnego”:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_i \\ \mathbf{N}_{in} \end{bmatrix} = \mathbf{F}(\mathbf{W}_i) \quad (2)$$

gdzie:

$\mathbf{A}_i$ – podsystem drogi wodnej,
 $\mathbf{N}_{in}$ – podsystem nawigacji drogi wodnej.

Przy czym i -ty odcinek drogi wodnej charakteryzują cztery parametry (elementy macierzy):

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} t_i \\ l_i \\ D_i \\ h_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

t_i – rodzaj i -tego odcinka drogi wodnej,
 l_i – długość i -tego odcinka drogi wodnej,
 D_i – szerokość dostępnego akwenu żeglugowego i -tego odcinka drogi wodnej,
 h_i – minimalna głębokość i -tego odcinka drogi wodnej.

Na każdym z odcinków drogi wodnej może pracować kilka (n) systemów nawigacyjnych, które charakteryzują trzy parametry:

$$\mathbf{N}_{in} = \begin{bmatrix} d_{in} \\ m_{in} \\ n_{in} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

d_{in} – dokładność n -tego systemu nawigacyjnego na i -tym odcinku drogi wodnej (odchylenie standardowe),
 m_{in} – dostępność n -tego systemu nawigacyjnego na i -tym odcinku drogi wodnej (zależna od pory doby i widzialności),
 n_{in} – niezawodność n -tego systemu nawigacyjnego na i -tym odcinku drogi wodnej (niezawodność techniczna).

Do określenia parametrów elementów dróg wodnych stosowane są metody optymalizacji gdzie funkcją celu jest koszt budowy i eksploatacji systemu morskich dróg wodnych, który można zapisać następująco [4]:

$$Z = (A_1 + A_2 + N_1 + N_2 + S_k) \rightarrow \min \quad (5)$$

przy ograniczeniu, którym jest warunek bezpieczeństwa nawigacji:

$$\left. \begin{aligned} & \mathbf{d}_{ijk}(1-\alpha) \subset \mathbf{D}_i(t) \\ & \bigwedge_{p(x,y) \in \mathbf{D}(t)} h_{xy}(t) \geq T_{xy}(t) + \Delta_{xy}(t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

gdzie:

$\mathbf{D}_i(t)$ – dostępny akwen żeglugowy na i -tym odcinku drogi wodnej (spełniony warunek bezpiecznej głębokości w momencie t),
 $\mathbf{d}_{ijk}(1-\alpha)$ – bezpieczny obszar manewrowy j -tego statku wykonującego manewr na i -tym odcinku drogi wodnej w k -tych warunkach nawigacyjnych określony na poziomie ufności $1-\alpha$,
 Z – koszt budowy i eksploatacji systemu dróg wodnych,
 A_1 – koszt budowy (przebudowy) drogi wodnej,
 A_2 – koszt eksploatacji drogi wodnej,
 N_1 – koszt budowy podsystemu określania położenia statku (systemów nawigacyjnych),
 N_2 – koszt eksploatacji systemów nawigacyjnych,
 S_k – koszty eksploatacji statku związane z przejściem drogi wodnej (pilotaż, asysta holownika, itp.),
 h_{xy} – głębokość akwenu w punkcie (x, y) ,
 T_{xy} – zanurzenie statku w punkcie (x, y) ,
 Δ_{xy} – rezerwa wody pod stępką w punkcie (x, y) .

Biorąc pod uwagę, że poszczególne koszty budowy i eksploatacji podsystemów są funkcją parametrów tych podsystemów, to funkcję celu można zapisać w postaci:

$$Z_i = (\mathbf{A}_{ik} + \mathbf{N}_{ik} + S_k) \rightarrow \min \quad (7)$$

przy ograniczeniach jak wyżej,

gdzie:

$\mathbf{A}_{ik}$ – macierz kosztów budowy i eksploatacji podsystemu drogi wodnej,
 $\mathbf{N}_{ik}$ – macierz kosztów budowy i eksploatacji podsystemu nawigacji.

METODA PROJEKTOWANIA I OPTYMALIZACJI PARAMETRÓW PRZEBUDOWYWANEGO TORU WODNEGO ŚWINOUJŚCIE – SZCZECIN POGŁĘBIONEGO DO 12,5 m

Podstawowym założeniem przebudowy toru wodnego Świnoujście – Szczecin było jego pogłębienie do 12,5 m oraz poszerzenie umożliwiające bezpieczną żeglugę „maksymalnych statków” w ruchu jednokierunkowym z możliwością mijania się (budowa mijanek), nie stwarzając ograniczeń ruchu.

Wykorzystując systemowe podejście do optymalizacji dróg wodnych, opracowano metodę optymalizacji parametrów przebudowywanego drogi wodnej. Przebudowa, spowodowana do określonego pogłębienia i odpowiedniego poszerzenia drogi wodnej, umożliwi eksploatację statków o większym zanurzeniu i odpowiedniej do niego długości i szerokości.

Tor wodny Świnoujście – Szczecin to morska droga wodna o zróżnicowanym charakterze, przechodząca od Zatoki Pomorskiej Świną, Kanałami Mieleńskim i Piastowskim, następnie przez Zalew Szczeciński i dalej korytem rzeki Odry i przez Przekop Mieleński do Portu Szczecin. Długość tego toru wynosi 68 km. Tor wodny Świnoujście – Szczecin na odcinku od 0,0 km do 16,5 km zmodernizowano i dostosowano do żeglugi „statków maksymalnych” (pogłębienie do 12,5 m). Dlatego też w artykule będzie rozpatrzony jedynie tor wodny od 16,5 km do 68,0 km.

Stosując podejście systemowe i posługując się określonymi kryteriami porównawczymi, tor wodny Świnoujście – Szczecin podzielono na następujące odcinki:

1. Odcinek prosty Zalew Szczeciński (16,5 km ÷ 41,0 km),
2. Zakręt Mańków (41,0 km ÷ 43,0 km),

3. Odcinek prosty Krępa – Kanał Policki (43,0 km ÷ 49,0 km),
4. Zakręt Police (49,0 km ÷ 50,0 km),
5. Dwa zakręty Ińskie i Babina (51,5 km ÷ 55,5 km),
- 5a. Odcinek prosty między zakrętem Ińskim i Babina (53,0 km ÷ 54,5 km),
6. Odcinek prosty Dębina (55,5 km ÷ 58,5 km),
7. Zakręt Święta (58,5 km ÷ 61,0 km),
8. Odcinek prosty Święta – Okrętowa (61,0 km ÷ 63,1 km),
9. Odcinek prosty Przekop Mieleński (64,0 km ÷ 68,0 km).

W celu określenia parametrów systemu omawianej drogi wodnej (toru wodnego Świnoujście – Szczecin) zastosowano dwa etapy projektowania i optymalizacji [6, 9]:

- wstępny,
- szczegółowy.

Etap wstępny projektowania i optymalizacji

W przypadku „statków maksymalnych” budowana jest macierz wstępnych warunków bezpiecznej eksploatacji badanego toru wodnego. Wierszami tej macierzy są warunki bezpiecznej eksploatacji „maksymalnych statków” rozpatrywanych rodzajów przewidzianych do eksploatacji:

$$\mathbf{M}^w = \begin{bmatrix} typ_1, & L_{c1}, & B_1, & T_1, & V_1, & C_1, & \mathbf{H}_1 \\ typ_2, & L_{c2}, & B_2, & T_2, & V_2, & C_2, & \mathbf{H}_2 \\ typ_3, & L_{c3}, & B_3, & T_3, & V_3, & C_3, & \mathbf{H}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1^w \\ \mathbf{W}_2^w \\ \mathbf{W}_3^w \end{bmatrix} \quad (8)$$

W oparciu o analizę perspektyw rozwoju portu Szczecin [8] określono, że w przypadku przebudowywanego toru wodnego Świnoujście-Szczecin „statkami maksymalnymi” będą:

1. Wycieczkowiec: $L_c = 260$ m; $B = 33,0$ m; $T = 9,0$ m.
2. Kontenerowiec: $L_c = 210$ m; $B = 30,0$ m; $T = 11,0$ m.
3. Masowiec: $L_c = 195$ m; $B = 29,0$ m; $T = 11,0$ m.

We wstępnych warunkach bezpiecznej eksploatacji nie uwzględniono statków (kontenerowiec, masowiec) częściowo załadowanych.

Systemy nawigacyjne, które będą stosowane na torze wodnym Świnoujście – Szczecin (po jego przebudowie) przez „maksymalne statki”, zależą od pory doby i widzialności. Są to:

- Dobra widzialność – dzień:
 - PNS (Pilotowy system nawigacyjny),
 - terestryczny.
- Dobra widzialność – noc:
 - PNS,
 - terestryczny lub radarowy (bardziej dokładny na badanym odcinku toru).
- Zła widzialność – $Z < 2$ Mm:
 - PNS,
 - radarowy.

Na wstępnym etapie projektowania i optymalizacji parametrów toru określono minimalny zapas wody pod stępką oraz bezpieczne szerokości obszarów manewrowych (minimalna

bezpieczna szerokość toru wodnego w dnie). Minimalny zapas wody pod stępką określono metodą rezerw składowych oraz metodą probabilistyczną [8]. Rezerwę wody pod stępką dla kontenerowca $T = 11,0$ m i masowca $T = 11,0$ m na prostoliniowych odcinkach toru wodnego Świnoujście – Szczecin pogłębionego do 12,5 m określono jako równą $\Delta = 1,5$ m. Na zakrętach toru rezerwa ta jest mniejsza o około 0,2 m. Rezerwa uwzględnia niskie poziomy wody ($\Delta h \leq 0,5$ m).

Parametry bezpiecznego obszaru manewrowego „maksymalnych statków” na torze wodnym Świnoujście – Szczecin w ruchu jednokierunkowym określono stosując następujące metody deterministyczne [8]:

- PIANC,
- Kanadyjska,
- INM (Instytutu Nawigacji Morskiej Akademii Morskiej w Szczecinie),

oraz metodę uogólnienia wyników badań symulacyjnych.

Bezpieczne szerokości toru wodnego Świnoujście – Szczecin dla „statków maksymalnych”, określone tymi metodami, wynoszą odpowiednio:

- odcinki prostoliniowe: $d = 110$ m;
- zakręty toru: $d = 150$ m;
- odcinki przejściowe między zakrętem i odcinkiem prostoliniowym: $d = 130$ m.

Etap szczegółowy projektowania i optymalizacji

A. Określenie parametrów toru wodnego w ruchu jednokierunkowym

W celu określenia optymalnych bezpiecznych szerokości toru wodnego opracowano algorytm obliczeń etapu szczegółowego, który różnicuje odcinki prostoliniowe i zakręty, gdyż stosowane są na nich różne metody obliczeń. Danymi wejściowymi do tego algorytmu są:

- wstępne warunki bezpiecznej eksploatacji „statków maksymalnych” $\mathbf{M}^w$,
- wstępny podsystem nawigacyjny poszczególnych odcinków toru wodnego $\mathbf{N}_i^w$,
- wstępny podsystem drogi wodnej (toru wodnego) $\mathbf{A}_i^w$ definiowany następująco:

$$\mathbf{A}_i^w = \begin{bmatrix} t_i \\ l_i \\ D_i^w \\ h_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

gdzie wyróżnia się trzy rodzaje drogi wodnej (t_i):

- odcinek prostoliniowy toru;
- zakręt toru;
- odcinek przejściowy między odcinkiem prostoliniowym a zakrętem o długości 250 m.

Ze wstępnego etapu projektowania przyjęto, że $h_i = 12,5$ m, a $\Delta_i = 1,5$ m oraz $D_i = d_i$ (dla poszczególnych rodzajów drogi wodnej wynoszą one odpowiednio 110 m, 150 m i 130 m).

Algorytm procesu szczegółowego projektowania przebudowywanego toru wodnego Świnoujście – Szczecin przedstawiono na rys. 2. Algorytm ten można opisać następująco:

1. Określenie szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych (szerokości toru wodnego) „statków maksymalnych” na poszczególnych odcinkach toru wodnego Świnoujście – Szczecin przy wykorzystaniu metody deterministyczno-probabilistycznej CIRM opracowanej w Akademii Morskiej w Szczecinie [6]. Szerokość bezpiecznych obszarów manewrowych jest określana na poziomie ufności $1 - \alpha = 0,95$ dla trzech „statków maksymalnych” manewrujących przy trzech warunkach widzialności i odpowiednim wyposażeniu nawigacyjnym oraz określonych na etapie projektowania wstępnych warunkach hydrometeorologicznych. Do dalszych obliczeń jest wybierana maksymalna bezpieczna szerokość ze zbioru wszystkich statków i warunków nawigacyjnych.
2. Określenie szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych na zakrętach i odcinkach przejściowych toru wodnego przy wykorzystaniu metod symulacji komputerowej dla dwóch „statków charakterystycznych”. Na modelach tych statków przeprowadzono badania symulacyjne. „Statkami charakterystycznymi” nazywane są dwa statki obliczeniowe wybrane ze zbioru „statków maksymalnych” badanych na wstępnym etapie. Statki te mają następujące cechy:
 - maksymalną szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego $\max(d_j)$,
 - maksymalną bezpieczną głębokość akwenu $\max(T_j + \Delta_j)$.

Budowane są wektory stanu warunków bezpiecznej eksploatacji „statków charakterystycznych”:

$$W_i[\max(d_j)]$$

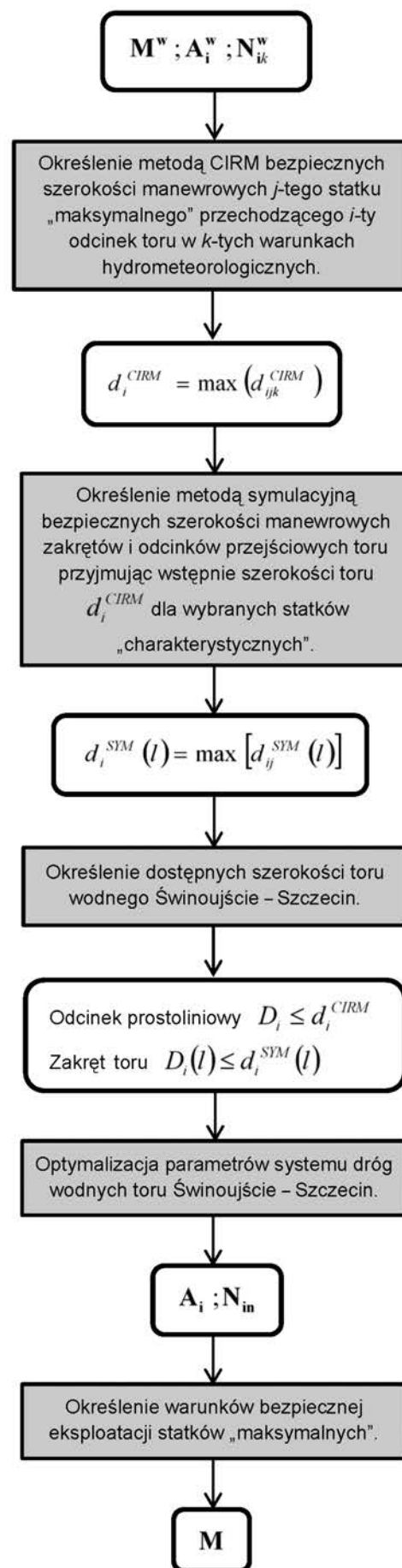
$$W_i[\max(T_j + \Delta_j)]$$

W przypadku badanego toru wodnego Świnoujście – Szczecin, „statkami charakterystycznymi” były odpowiednio:

- wycieczkowiec $L_c = 260$ m, $B = 33$ m, $T = 9,0$ m,
- masowiec $L_c = 195$ m: $B = 29$ m; $T = 11,0$ m.

Szerokość bezpiecznych obszarów manewrowych określono na poziomie ufności $1 - \alpha = 0,95$. W badaniach wykorzystano metodę symulacji ruchu w czasie rzeczywistym (RTS), wykorzystując modele nieautonomiczne, w których ruchem statku kieruje człowiek (pilot, kapitan). Badania symulacyjne przeprowadzono na wielomostkowym symulatorze manewrowym typu Polaris firmy Konsberg Maritime AS z wizualizacją typu projekcyjnego 3D. Jest to symulator typu FMBS (*Full Mission Bridge Simulation*) znajdujący się w Centrum Inżynierii Ruchu Morskiego (CIRM) Akademii Morskiej w Szczecinie.

W metodach symulacji komputerowej określających szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych statków wykorzystywano wstępne szerokości toru określone metodą CIRM. Procedura badań symulacyjnych stosowana



Rys. 2. Algorytm szczegółowego projektowania przebudowy toru wodnego Świnoujście – Szczecin

przy projektowaniu morskich dróg wodnych jest przeprowadzana w następującej kolejności [5]:

- sformułowanie problemu badawczego, w tym określenie celu projektowania, zastosowanych metod symulacji i rodzaju symulatorów;
- budowa modeli ruchu statków na wybranym symulatorze oraz ich weryfikacja;
- projektowanie układu eksperymentalnego i przeprowadzenie eksperymentu;
- opracowanie i analiza statystyczna wyników badań.

3. Określenia dostępnych szerokości toru wodnego Świnoujście – Szczecin przeprowadzono na odcinkach prostoliniowych, wykorzystując metodę CIRM:

$$D_i \leq d_i^{CIRM}$$

natomiast na zakrętach i odcinkach przejściowych wykorzystuje się wyniki badań symulacyjnych:

$$D_i(l) \leq d_i^{SYM}(l)$$

Szerokości te określono w funkcji długości toru (l).

4. Optymalizacja parametrów systemu dróg wodnych toru Świnoujście – Szczecin na odcinkach prostoliniowych. Optymalizację parametrów dwóch podsystemów morskich dróg wodnych przeprowadza się na podstawie dokładnego określenia kosztów budowy i eksploatacji poszczególnych rozwiązań morskiej drogi wodnej traktowanej jako system. Przy założeniach:

$$Z_i = (A_{ki} + N_{kin}) \rightarrow \min$$

oraz spełnieniu podstawowego warunku bezpiecznej nawigacji określa się parametry systemu projektowanej drogi wodnej:

$$A_i; N_i$$

Na szczegółowym etapie projektowania podsystem nawigacyjny N_{in} rozbudowano do dwóch podstawowych systemów nawigacyjnych dla trzech warunków widzialności. Optymalizacja parametrów zakrętów toru wodnego Świnoujście – Szczecin jest przeprowadzana podobnie jak w przypadku odcinków prostoliniowych toru. Różnica polega na tym, że bezpieczna szerokość toru wodnego na zakrętach jest zmienna, dlatego posłużono się tu pojęciem bezpiecznego obszaru manewrowego zakrętu.

5. Określenie warunków eksploatacji „statków maksymalnych” wszystkich rodzajów ujętych w macierzy wstępnych warunków bezpiecznej eksploatacji statków. Polega ono na takim zwiększeniu parametrów statków mniejszych rodzajów L_c i B przy $T = \text{const.}$ ($T = 11,0$ m – dla toru wodnego Świnoujście – Szczecin), aby bezpieczne obszary manewrowe „statków maksymalnych” wszystkich rodzajów były równe, to znaczy:

$$d_{ij} = d_i - \text{odcinek prostoliniowy,}$$

$$d_{ij}(l) = d_i(l) - \text{zakręt toru.}$$

Umożliwi to określenie macierzy bezpiecznej eksploatacji „statków maksymalnych” M .

B. Określenie lokalizacji i parametrów mijanek toru wodnego

Przy projektowaniu mijanek na jednokierunkowych torach wodnych rozwiązywane są dwa problemy:

- określenie bezpiecznej szerokości mijanek przy określonej wielkości statków;
- lokalizacja mijanek na torze wodnym.

Bezpieczną szerokość mijanek przy określonej wielkości statków określa się metodą CIRM dwukierunkowych torów wodnych.

Lokalizacja mijanek na jednokierunkowych torach wodnych jest wykonywana metodą symulacji komputerowej strumieni ruchu statków dla zadanych parametrów prognozowanego ruchu. Lokalizację mijanek przeprowadza się według następującego algorytmu postępowania:

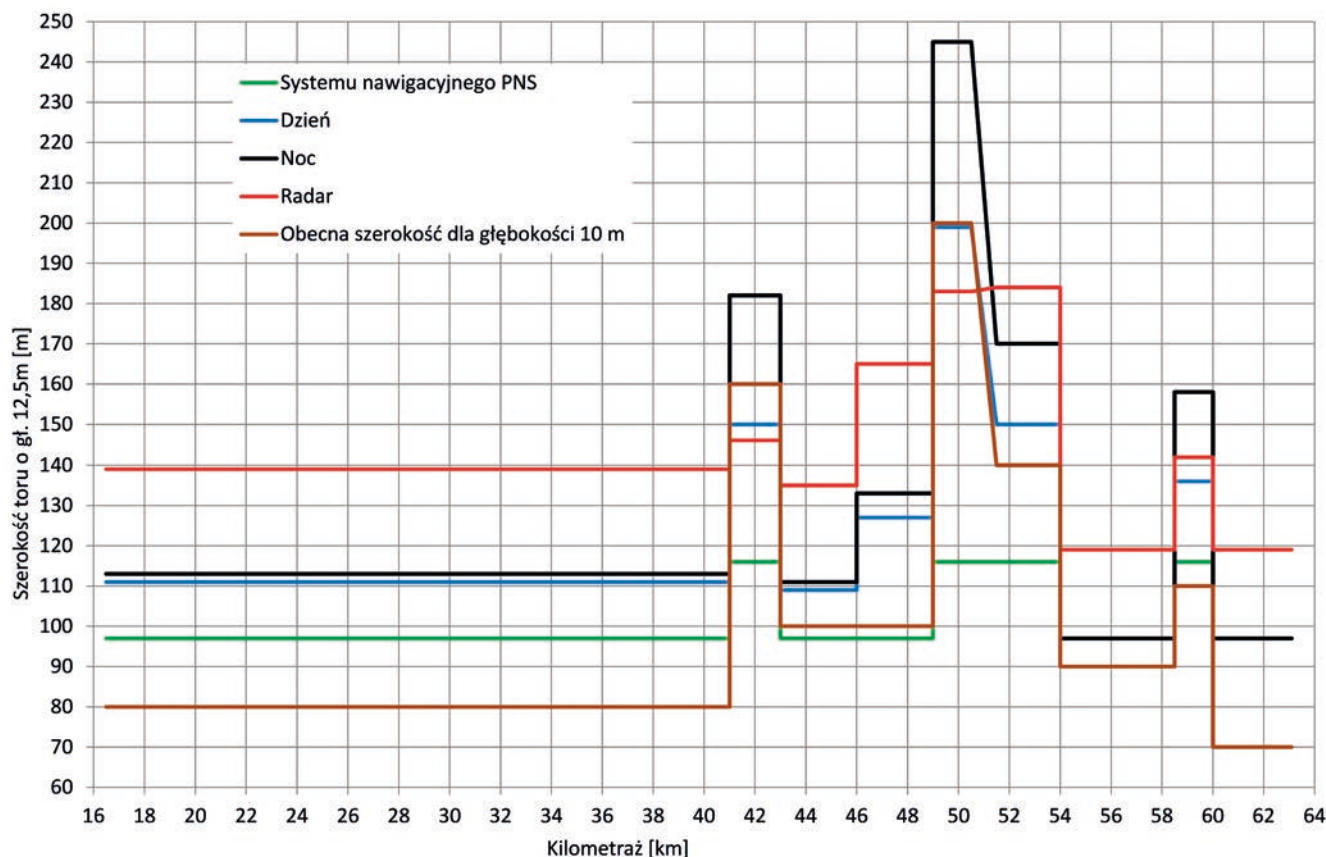
1. Określenie prognozy ruchu statków w grupach wielkościowych i rodzajowych.
2. Określenie realnych wariantów lokalizacji mijanek oraz ich parametrów.
3. Określenie kosztów budowy mijanek w poszczególnych wariantach.
4. Symulacja komputerowa prognozowanych strumieni ruchu statków na torze wodnym, która określa:
 - prawdopodobieństwo powstania kolejek statków w poszczególnych grupach wielkościowych;
 - roczne czasy oczekiwania statków wchodzących na tor wodny.
5. Wybór optymalnego wariantu lokalizacji mijanek przy uwzględnieniu dwóch kryteriów:
 - minimalizacja kosztów budowy mijanek,
 - minimalizacja rocznych czasów oczekiwania statków wchodzących na tor.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ OPTIMALIZACJI PARAMETRÓW PRZEBUDOWYWANEGO TORU WODNEGO ŚWINOUJŚCIE – SZCZECIN

Minimalne bezpieczne szerokości toru wodnego Świnoujście – Szczecin na poziomie ufności $1 - \alpha = 0,95$ poszczególnych odcinków toru wodnego dla trzech rodzajów „statków maksymalnych”, opisanych powyżej, manewrujących w trzech różnych warunkach hydrometeorologicznych określono metodą CIRM. Obliczenia prowadzono dla dwóch kierunków przejścia do Szczecina i do Świnoujścia.

Największe bezpieczne szerokości toru wymaga wycieczkowca $L_c = 260$ m. Szerokości te jako d_i^{CIRM} przyjęto do dalszych badań. Wyniki obliczeń dla wycieczkowca poruszającego się ze Świnoujścia do Szczecina, przy obecnym oznakowaniu nawigacyjnym, przedstawiono na rys. 3.

W wyniku optymalizacji na szczegółowym etapie projektowania określono optymalne parametry oznakowania nawigacyjnego oraz szerokości prostoliniowych odcinków toru. Bezpieczna szerokość prostoliniowych odcinków toru wodnego Świnoujście – Szczecin w przypadku zoptymalizowanego podsystemu nawigacyjnego wynosi $d_i(0,95) = 100$ m [1].



Rys. 3. Bezpieczna szerokość toru wodnego Świnoujście – Szczecin wycieczkowca poruszającego się ze Świnoujścia do Szczecina przy obecnym oznakowaniu nawigacyjnym na poziomie ufności $1 - \alpha = 0,95$

Na wstępnym etapie projektowania przebudowywanego toru wodnego Świnoujście – Szczecin badano trzy „statki maksymalne” [1]:

- kontenerowiec $L_c = 210$ m,
- wycieczkowiec $L_c = 260$ m,
- masowiec $L_c = 195$ m.

Dwa z tych „statków maksymalnych” uzyskało na zakrętach toru porównywalne szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych (metoda CIRM); są to wycieczkowiec i masowiec. Kontenerowiec uzyskał mniejsze szerokości bezpiecznych akwenów manewrowych. W związku z powyższym do badań symulacyjnych na zakrętach toru zakwalifikowano dwa „statki charakterystyczne” (obliczeniowe):

- wycieczkowiec $L_c = 260$ m,
- masowiec $L_c = 195$ m.

Celem badań symulacyjnych było określenie bezpiecznych obszarów manewrowych „statków charakterystycznych” na zakrętach i obrotnicach toru wodnego Świnoujście – Szczecin. Do badań symulacyjnych zakwalifikowano następujące zakręty:

- zakręt Mańków (41,0 km ÷ 43,0 km);
- zakręty Inskie i Babina (51,5 km ÷ 55,5 km);
- zakręt Święta (58,5 km ÷ 61,0 km).

Szerokość bezpiecznych obszarów manewrowych określono na poziomie ufności $1 - \alpha = 0,95$. W badaniach wykorzystano metodę symulacji ruchu w czasie rzeczywistym (RTS), stosując modele nieautonomiczne, w których ruchem statku kieruje czło-

wiek (pilot, kapitan). Badania symulacyjne przeprowadzono na wielomostkowym symulatorze manewrowym typu Polaris firmy Konsberg Maritime AS z wizualizacją typu projekcyjnego 3D. Jest to symulator typu FMBS (*Full Mission Bridge Simulation*) znajdujący się w Centrum Inżynierii Ruchu Morskiego (CIRM) Akademii Morskiej w Szczecinie.

Zbudowano i zweryfikowano dwa modele „statków charakterystycznych” o następujących parametrach [1]:

Wycieczkowiec:

- $L_c = 260$ m – długość całkowita,
- $L_{pp} = 220$ m – długość między pionami (oznaczona także jako L),
- $B = 33$ – szerokość,
- $T = 9$ m – zanurzenie,
- $m = 45\ 500$ t – wyporność (odpowiada nośności około 8000 t),
- $A_L = 8700$ m² – boczna powierzchnia nawiewu,
- napęd: dwusrubowy; moc silników 4×7875 kW (diesel, razem 31 500 kW); rodzaj śrub – nastawne, do wewnątrz skrętne; stery rufowe – Beckera; stery strumieniowe: 3×1400 kW (dziób) i 2×1400 kW (rufa).

Masowiec:

- $L_c = 195$ m – długość całkowita,
- $L_{pp} = 185$ m – długość między pionami (oznaczona także jako L),
- $B = 29$ m – szerokość,

- $T = 11$ m – zanurzenie,
- $m = 47\,000$ t – wyporność pod ładunkiem (odpowiada nośności około 38 000 t),
- $A_L = 1200$ m² – boczna powierzchnia nawiewu,
- napęd: jednośrubowy; moc silnika 8500 kW (diesel); rodzaj śruby – nastawna, lewoskrętna; ster rufowy – konwencjonalny; stery strumieniowe: brak.

Opracowano następujące zakresy badań symulacyjnych przejścia wycieczkowca i masowca torem wodnym Świnoujście – Szczecin ($V = 8$ węzłów):

1. Zakręt Mańków 41,0 km ÷ 43,0 km / ± 250 m: (2 serie badań dla każdego „statku charakterystycznego” przy dwóch różnych kierunkach wiatru NW i SW)
 - Przejście do Szczecina
 - Prąd = 0
 - Wiatr = 10 m/s NW i SW
2. Zakręt Ińskie – Babina 51,5 km ÷ 55,5 km / ± 250 m: (2 serie badań dla każdego „statku charakterystycznego” przy dwóch różnych kierunkach wiatru S i W)
 - Przejście do Świnoujścia
 - Prąd = wychodzący 0,7 węzła
 - Wiatr = 10 m/s S i W
3. Zakręt Święta 58,5 km ÷ 61,0 km / ± 250 m: (2 serie badań dla każdego „statku charakterystycznego” przy dwóch różnych kierunkach wiatru S i W)

- Przejście do Świnoujścia
- Prąd = wychodzący 0,7 węzła
- Wiatr = 10 m/s S i W

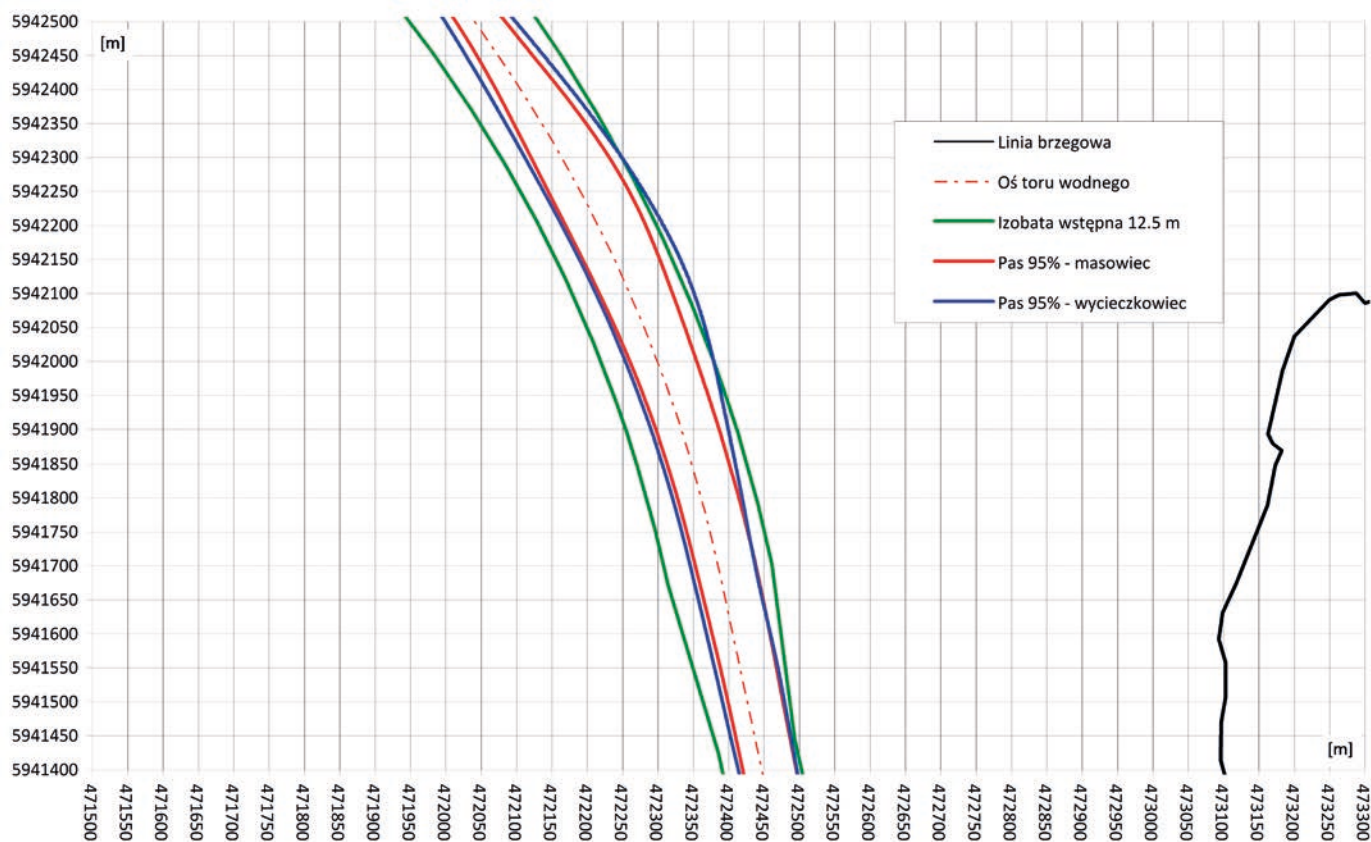
Minimalną liczbę manewrów symulacyjnych w serii badań przyjęto jako równą $n = 12$ dla jednego kierunku wiatru [5]. Manewry symulacyjne wykonywali piloci Stacji Pilotowej w Szczecinie, kapitanowie posiadający doświadczenie w manewrowaniu dużymi statkami. Każda z osób wykonywała 2 manewry symulacyjne w danej serii badań.

Analiza wyników badań symulacyjnych przy wykorzystaniu statystycznych testów zgodności wykazała:

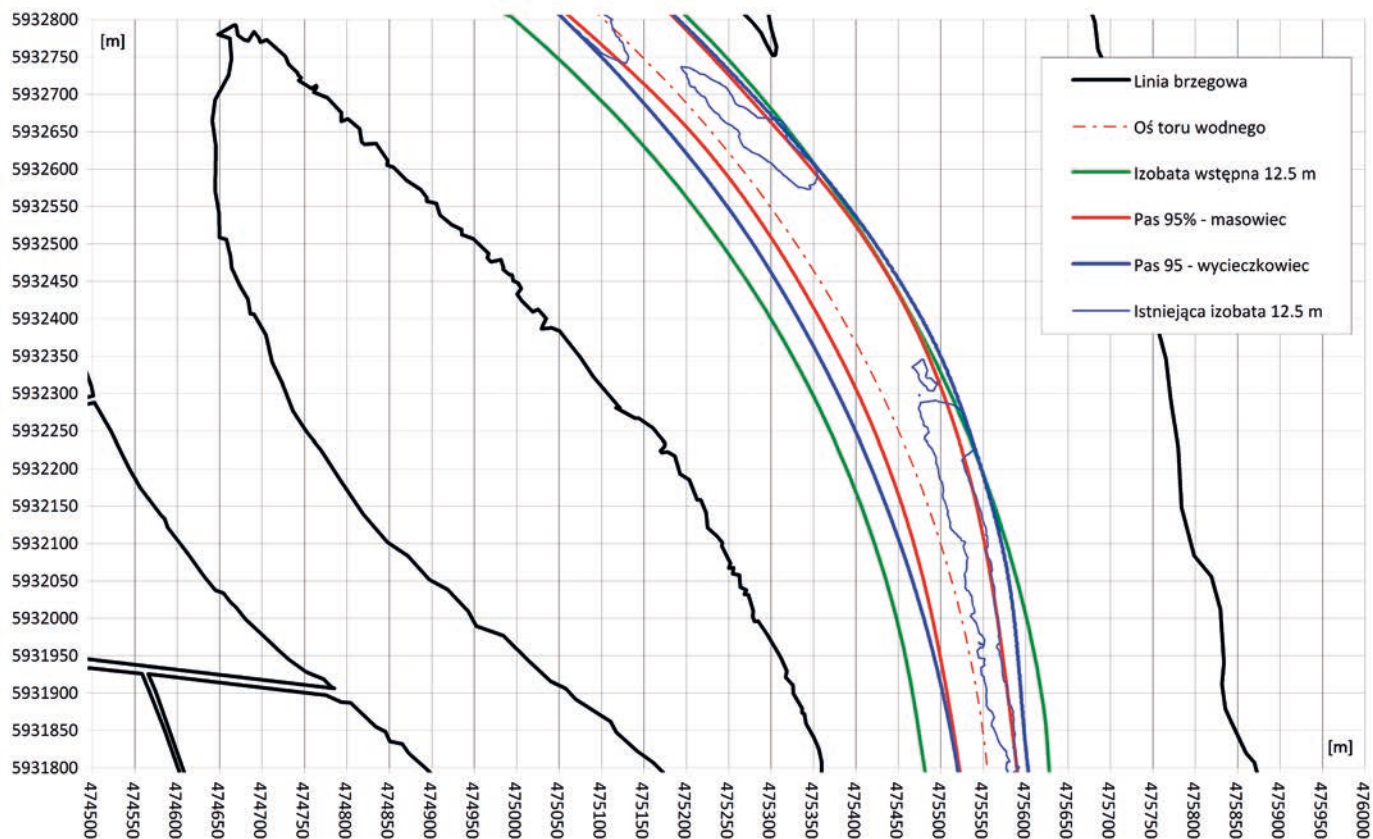
1. Największe szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych na wszystkich zakrętach osiąga wycieczkowiec $L_c = 260$ m.
2. Na wszystkich badanych zakrętach szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych określonych metodami symulacyjnymi są mniejsze od szerokości określonych metodą CIRM.

Wyniki badań symulacyjnych w postaci bezpiecznych obszarów manewrowych wycieczkowca i masowca określonych na poziomie istotności 0,95 przedstawiono dla następujących zakrętów toru wodnego Świnoujście – Szczecin [1, 2]:

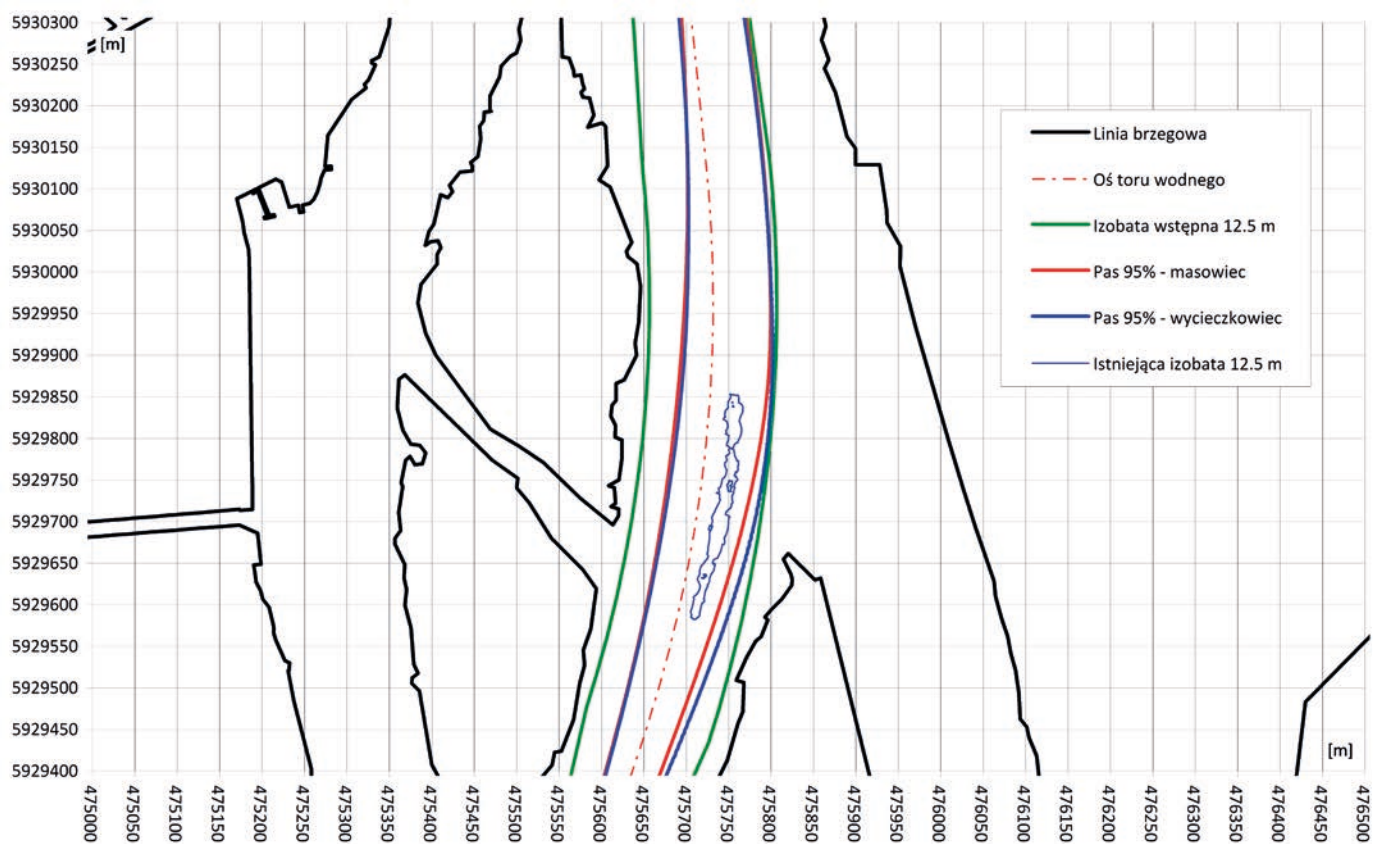
- Zakręt Mańków – rys. 4;
- Zakręt Ińskie – rys. 5;
- Zakręt Babina – rys. 6;
- Zakręt Święta – rys. 7.



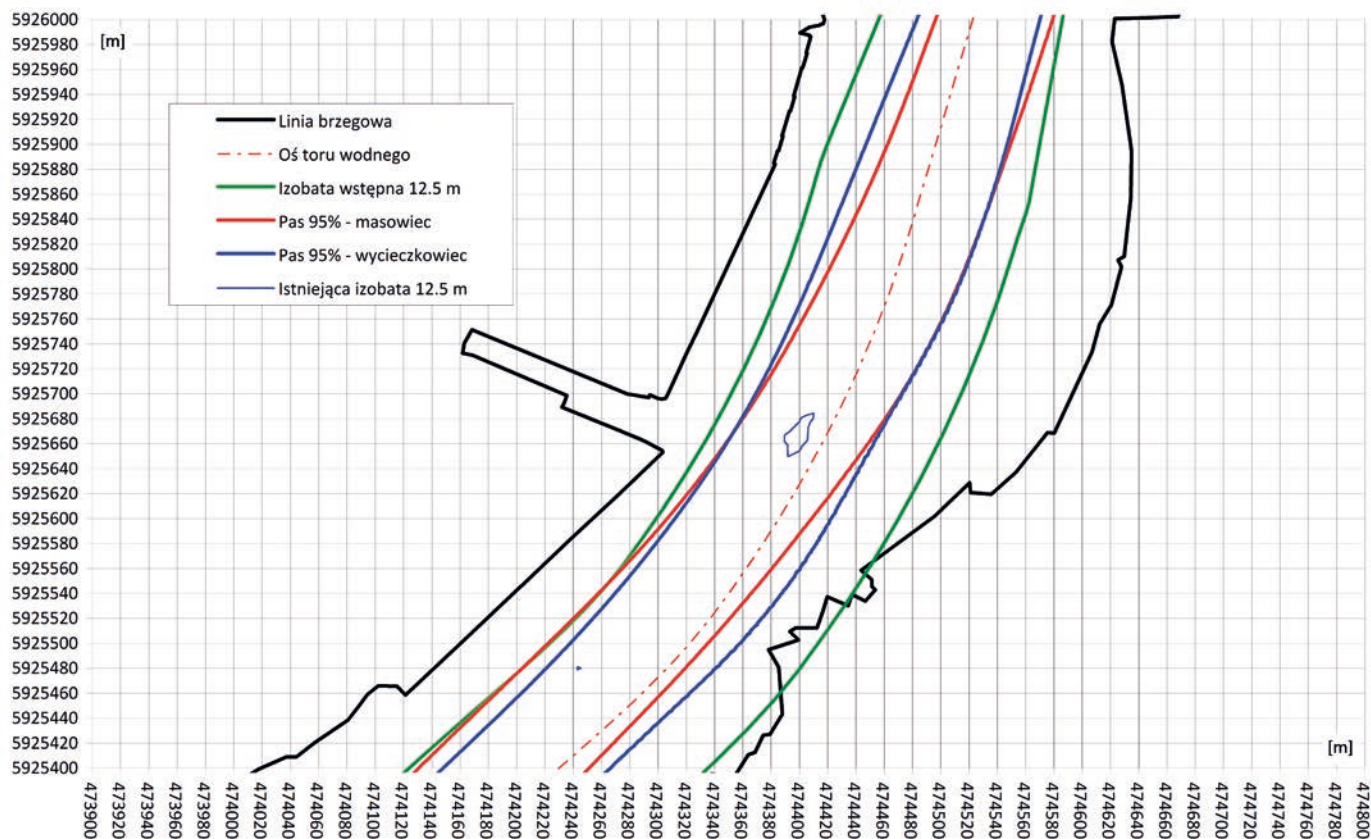
Rys. 4. Bezpieczne obszary manewrowe wycieczkowca i masowca na zakręcie Mańków (41,0 km ÷ 43,0 km toru wodnego Świnoujście – Szczecin)
Prędkość wiatru 10 m/s



Rys. 5. Bezpieczne obszary manewrowe wycieczkowca i masowca na zakręcie Ińskie (51,5 km ÷ 53,0 km toru wodnego Świnoujście – Szczecin)
Prędkość wiatru 10 m/s



Rys. 6. Bezpieczne obszary manewrowe wycieczkowca i masowca na zakręcie Babina (54,5 km ÷ 55,5 km toru wodnego Świnoujście – Szczecin)
Prędkość wiatru 10 m/s



Rys. 7. Bezpieczne obszary manewrowe wycieczkowca i masowca na zakręcie Święta (58,5 km ÷ 61,0 km toru wodnego Świnoujście – Szczecin)
Prędkość wiatru 10 m/s

Na rysunkach tych naniesiono wstępne izobaty 12,5 m wyznaczone na etapie projektowania wstępnego przy wykorzystaniu metody CIRM oraz bezpieczne izobaty 12,5 m wyznaczone na podstawie badań symulacyjnych wycieczkowca i masowca (określone jako pasy ruchu 95%). Dostępny akwen żeglugowy, spełniający kryteria minimalnych kosztów budowy i eksploatacji oraz warunki bezpieczeństwa nawigacji, zaprojektowano na podstawie bezpiecznych obszarów manewrowych określonych przy wykorzystaniu badań symulacyjnych.

Wykorzystując przeprowadzone badania symulacyjne, określono optymalne poziome parametry zakrętów toru wodnego Świnoujście – Szczecin (rys. 4 ÷ 7). Parametry te określono na podstawie bezpiecznych obszarów manewrowych wycieczkowca $L_c = 260$ m, gdyż ich szerokości były większe od szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych masowca $L_c = 195$ m.

Uwzględniając różnice manewrowe badanych rodzajów statków (wycieczkowiec, kontenerowiec i masowiec), na podstawie analizy ich szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych określonych metodą CIRM i metodą symulacyjną określono warunki bezpiecznej eksploatacji tych statków na torze wodnym Świnoujście – Szczecin. Odpowiednio powiększono ich parametry (L_c , B), aby spełniały warunki:

$$d_{ij} = d_i$$

$$d_{ij}(l) = d_i(l)$$

Wykorzystując powyższe analizy, określono maksymalne bezpieczne parametry statków dla przebudowanego toru wodnego Świnoujście – Szczecin:

1. Wycieczkowiec $L_c = 260$ m; $B = 33,0$ m; $T = 9,0$ m;
2. Kontenerowiec $L_c = 240$ m; $B = 32,3$ m; $T = 11,0$ m;
3. Masowiec $L_c = 220$ m; $B = 32,3$ m; $T = 11,0$ m;

oraz warunki ich bezpiecznej eksploatacji:

- pora doby – bez ograniczeń
- widzialność – powyżej 2 Mm
- prędkość statku – $V \leq 8$ węzłów
- prędkość wiatru – $V_w \leq 10$ m/s
- kierunek wiatru – bez ograniczeń
- prędkość prądu – $V_p \leq 1$ węzeł
- kierunek prądu – wyjściowy (rzeka)
- wysokość fali – $h_f = 0,0$ m
- warunki lodowe – kasza lodowa i gruz lodowy
- rezerwa na niski poziom zwierciadła wody – $\Delta h \leq 0,5$ m
- asysta holowników – nie wymagana.

Dla statków tych określono również bezpieczne parametry obrotnic toru wodnego Świnoujście – Szczecin. Są to:

- Obrotnica Przesmyk Orli (63,0 km ÷ 64,0 km) – metoda symulacyjna [7],
- Obrotnica Parnica (67,0 km ÷ 67,4 km) – metoda empiryczna [7].

Przedstawione w artykule wyniki badań optymalizacyjnych wykorzystano do opracowania modelu matematycznego toru wodnego [1], na podstawie którego wykonano projekt techniczny jego przebudowy. Inwestycja ta jest obecnie realizowana.

LITERATURA

1. Analiza nawigacyjna modernizacji Toru Wodnego Świnoujście-Szczecin (pogłębienie do 12,5 m). Praca naukowo-badawcza wykonana na zlecenie Europrojekt Gdańsk S.A. Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2015.
2. Artyszuk J. i inni: Optimization of waterway bend width by computer methods of ship movement simulation. Conference on Marine Traffic Engineering and International Symposium Information on Ships (MTE/ISIS). Kołobrzeg, 14-16.10.2015. Organization: Maritime University of Szczecin and German Institute of Navigation (DGON), 2015.
3. Gucma S.: Conditions of safe ship operation in sea waterway systems. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, No 36(108) 2013, z. 1, Szczecin 2013, ISSN 1733-8670, 55-58.
4. Gucma S.: Optimization of sea waterway system parameters in marine traffic engineering. Journal of Konbin, No 2(26) 2013, Wydawnictwo ITWL, Warszawa, ISSN 1895-8281, 51-60.
5. Gucma S., Gucma L., Zalewski P.: Symulacyjne metody badań w inżynierii ruchu morskiego. Monografia pod redakcją Stanisława Gucmy. Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2008, ISBN 978-83-89901-29-3.
6. Gucma S. i inni: Morskie drogi wodne. Projektowanie i eksploatacja w ujęciu inżynierii ruchu. Wydawnictwo: Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2015, ISBN 978-83-60584-51-4.
7. Gucma S., Ślaczka W.: Ship movement simulation studies used for optimizing waterway system elements the case of a turning basin Przesmyk Orli in the port of Szczecin. Conference on Marine Traffic Engineering and International Symposium Information on Ships (MTE/ISIS). Kołobrzeg, 14-16.10.2015. Organization: Maritime University of Szczecin and German Institute of Navigation (DGON), 2015.
8. Określenie docelowych bezpiecznych parametrów toru wodnego Świnoujście – Szczecin. Praca naukowo-badawcza zlecona przez Zarząd Morskich Portów Szczecin i Świnoujście; Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2008.
9. PIANC: Harbour Approach Channels Design Guidelines. PIANC Report, PIANC Secretariat General. Bruksela 2014.