

Projektowany port do obsługi morskich farm wiatrowych w Świnoujściu – analiza ryzyka nawigacyjnego

Prof. dr hab. inż. kpt. ż.w. Stanisław Gucma, dr inż. Rafał Gralak
Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny

Morskie farmy wiatrowe (MFW) powstające na Bałtyku w polskiej strefie ekonomicznej będą dysponować do 2030 roku łączną generowaną mocą 6 GW [13]. Do uzyskania takiej mocy planowana jest budowa około 430 morskich turbin wiatrowych o jednostkowej mocy 14 MW. Projektowany port w Świnoujściu przewidywany jest do obsługi statków instalujących oraz serwisujących turbiny wiatrowe w polskiej strefie ekonomicznej.

Na świecie nie postawiono jeszcze morskiej turbiny wiatrowej o jednostkowej mocy 14 MW. Obecnie największą zainstalowaną morską turbiną wiatrową jest prototyp firmy General Electric o nazwie Haliade-X 12MW i mocy 12 MW. Zamontowano ją na potrzeby badań w porcie Rotterdam w 2019 roku [3]. Do wskazania jednostek pływających, które będą wykorzystywane do budowy oraz eksploatacji MFW na Bałtyku i obsługiwane przez port w Świnoujściu przyjęto metodę badań polegającą na analizie publikacji naukowych i prasowych, specyfikacji technicznej prototypów oraz dokumentacji z ich testów i badań, w następujących obszarach:

- specyfikacja prototypów morskich turbin wiatrowych spełniających wytyczne Inwestora,
- charakterystyki statków do budowy morskich farm wiatrowych (MFW) oraz transportu komponentów składowych morskich turbin wiatrowych (MTW) o mocy 14 MW.

Według terminologii stosowanej w sektorze morskich farm wiatrowych do ich budowy wykorzystuje się następujące statki [2]:

- a) FTIV Foundation Transport and Installation Vessel – do transportu/installacji fundamentów;
- b) WTTV Wind Turbine Transport Vessel – do transportu elementów składowych morskiej turbiny wiatrowej;
- c) WTIV Wind Turbine Installation Vessel – do transportu i instalacji MTW.

W Porcie Świnoujście nie planuje się obsługi statków do transportu i instalacji fundamentów – FTIV w związku z tym port ten będzie miał dwa nabrzeża:

- nabrzeże instalacyjne do obsługi statków typu WTIV
- nabrzeże serwisowe do obsługi statków typu WTTV.

W artykule określono:

- rodzaje i parametry statków przewidzianych do obsługi przy nabrzeżach instalacyjnym i serwisowym projektowanego portu w Świnoujściu,

- warunki bezpiecznej eksploatacji statków typu WTTV i WTIV,
- optymalne parametry akwenów portu do obsługi farm wiatrowych w Świnoujściu.

Warunki bezpiecznej eksploatacji statków określono przy wykorzystaniu specjalnie opracowanych metod analizy ryzyka nawigacyjnego.

STATKI OBSŁUGIWANE W PORCIE DO OBSŁUGI MORSKICH FARM WIATROWYCH W ŚWINOUJŚCIU

Do budowy MFW, w których stosuje się turbiny do 10 MW, tak zwanej trzeciej generacji, wykorzystuje się statki tej samej generacji. Na koniec 2020 roku we flocie światowej znajdowało się 137 statków przystosowanych do instalacji MTW. Z przeprowadzonej analizy wynika, że tylko 9 z nich jest przystosowanych do instalacji morskich turbin wiatrowych o mocy powyżej 10 MW [12], z czego tylko 4 z nich są w stanie zainstalować przyjętą do analizy turbinę o mocy 14 MW.

Do budowy morskich farm wiatrowych stosujących turbiny o mocy 14 MW i większej, wykorzystywane będą statki czwartej generacji dysponujące urządzeniami przeładunkowymi o znacznie większym udźwigu, wysięgu oraz nośności [11] (rys. 1).

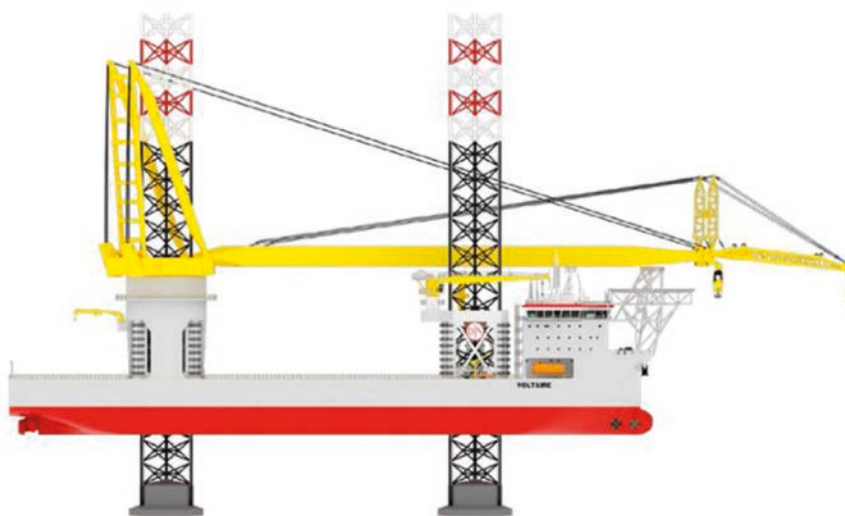
Według raportów podmiotów z branży odnawialnej energetyki wiatrowej zdecydowaną większość statków WTIV będą stanowić statki typu *jack-up*. Mają one znaczącą przewagę w zakresie stabilizacji jednostki oraz wysięgu urządzeń instalacyjnych w stosunku do konwencjonalnych jednostek typu *heavy lift* [1, 15].

Jak wynika z analizy charakterystyk projektowych statków WTIV czwartej generacji (lub zmodernizowanych statków trzeciej generacji), charakteryzują się one przede wszystkim zwiększonym udźwigiem urządzeń instalacyjno/przeładunkowych. Wynika to bezpośrednio ze zwiększonych rozmiarów i wagi elementów MTW.

Na bezpieczeństwo nawigacji mają wpływ wielkości i właściwości manewrowe statków. Parametry te wyznaczają „statek maksymalny” definiowany jako największy statek, który przy założonych warunkach nawigacyjnych może bezpiecznie manewrować na portowych drogach wodnych. Wymiarowanie portowych dróg wodnych oraz określenie warunków bezpiecznej

Generation:	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Operational:	2005	2010	2015	2022
Description:	First heavy lift jack-ups in offshore wind	New designs primarily for offshore wind	Scaled-up designs for larger turbines	Next generation for future 15MW turbines
Average crane capacity:	500 ton	900 ton	1.400 ton	2.5 - 3.500 ton
Average variable load:	2.000 ton	5.000 ton	8.500 ton	10 - 16.000 ton
Typical Wind Turbine:	3 MW	6 MW	9 MW	15 MW
Example:				

Rys 1. Kategoryzacja statków WTIV [16]



Rys. 2. Statek typu *jack-up* „Voltaire” (obecnie w budowie) [10]

eksploatacji statków na tym akwenie wymaga zdefiniowania parametrów „statków maksymalnych” przewidzianych do eksploatacji typów [5].

Do parametrów „statków maksymalnych” obsługujących morskie turbiny wiatrowe, które determinują wymiarowanie akwenów portowych dla każdego rodzaju obsługiwanych statków, należy zaliczyć:

- długość całkowita – L_C ,
- długość nadwodna – L^{nad} ,
- szerokość – B ,
- szerokość nadwodna (z ładunkiem pokładowym) – B^{nad} ,
- zanurzenie – T ,
- zanurzenie portowe (zanurzenie, do którego można załadować statek przy nabrzeżu podczas załadunku lub wyładunku) – T^{port} ,
- nadwodna wysokość H_{st} ,

Ze względu na przyszłościowy charakter inwestycji planowanej na 2024 rok, kierując się rozwojem światowej floty czwartej generacji, określono parametry „statków maksymalnych” przewidywanych do obsługi w Porcie Świnoujście:

1. WTIV – statek typu *jack-up* „Voltaire” (rys. 2) o parametrach [10]:

- $L_C = 169,3$ m,
- $L^{nad} = 181,1$ m (dźwig),
- $B = 60$ m,
- $B^{nad} = 110$ m (ładunek pokładowy),
- $T = 7,5$ m,
- Brak parametru zanurzenie portowe
- $H_{st} = 122,5$ m.

Podczas pracy w systemie *jack-up* statek stoi na 4 nogach i załadowuje się własnym dźwigiem (udźwig do 3 000 ton). W systemie *jack-up* statek może pracować na akwenie o głębokości do $h = 80$ m [10];

2. WTTV – statek typu *heavy lift* „Blue Azurit” (rys. 3) o parametrach:

- $L_C = 178,3$ m,
- $B = 36,5$ m,
- $T = 7,0$ m;



Rys.3. Blue Azurit – warianty transportu komponentów MTW

3. WTTV – specjalistyczny statek typu Ro-Ro „Big Roll” o parametrach:

- $L_c = 162,8$ m,
- $B = 42,0$ m,
- $T = 6,5$ m,
- $T^{port} = 10,5$ m.

WARUNKI BEZPIECZNEJ EKSPLOATACJI STATKÓW W PROJEKTOWANYM PORCIE DO OBSŁUGI MORSKICH FARM WIAТРOWYCH W ŚWINOUJŚCIU

Parametry systemu portowych dróg wodnych (podsystem akwenu i podsystem nawigacyjny) są funkcją warunków bezpiecznej eksploatacji statków tam manewrujących [5]:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ N_i \end{bmatrix} = F(W_i) \quad (1)$$

gdzie:

- A_i – podsystem akwenu (i -ty odcinek),
 N_i – podsystem nawigacyjny (i -ty odcinek),
 W_i – warunki bezpiecznej eksploatacji statków (i -ty odcinek).

W skład projektowanego portu do obsługi farm wiatrowych w Świnoujściu wchodzi dwa różne nabrzeża [17]:

- nabrzeże instalacyjne do obsługi statków typu WTIV (*jack-up*)
- nabrzeże serwisowe do obsługi statków typu WTTV (*heavy lift*).

Systemy morskich dróg wodnych i warunki bezpiecznej eksploatacji statków tam manewrujących są definiowane w zależności od rodzaju drogi wodnej i wykonywanego tam manewru [6]. Z powyższych względów akweny portowe projektowanego portu podzielono na:

- tor podejściowy (Obrotnica Mielńska – akwen podejściowy do nabrzeża),
- akwen podejścia do nabrzeża z możliwością obracania.

Statki WTIV i WTTV mają różne parametry oraz różne systemy załadunku i dlatego warunki ich bezpiecznej eksploatacji będą określone oddzielnie. Warunki bezpiecznej eksploatacji statków na drodze wodnej opisuje zbiór warunków bezpiecznej eksploatacji „statku maksymalnego” na i -tym odcinku badanej drogi wodnej, który zapisuje się w postaci [6]:

$$W_i^t = [t_{yp}, L_c, B, T, V_i, C, H_i] \quad (2)$$

gdzie:

- t_{yp} – typ „statku maksymalnego”,
 L_c – długość całkowita „statku maksymalnego”,
 B – szerokość „statku maksymalnego”,
 T – zanurzenie „statku maksymalnego”,
 V_i – dopuszczalna prędkość „statku maksymalnego” na i -tym odcinku toru wodnego,
 C_i – asysta holownicza na i -tym odcinku toru wodnego jeśli jest niezbędna (wymagana ilość i uciagi holowników).
 H_i – zbiór warunków hydrometeorologicznych dopuszczalnych dla „statku maksymalnego” na i -tym odcinku drogi wodnej:

$$H_i = [d/n, s, \Delta h_i, V_{wi}, KR_{wi}, V_{pi}, KR_{pi}] \quad (3)$$

gdzie:

- d/n – dopuszczalna pora doby (dzień lub bez ograniczeń),
 s – widzialność,
 Δh_i – dopuszczalne obniżenie poziomu zwierciadła wody,
 V_{wi} – dopuszczalna prędkość wiatru na i -tym odcinku,
 KR_{wi} – ograniczenia kierunku wiatru (jeśli występują na i -tym odcinku),
 V_{pi} – dopuszczalna prędkość prądu na i -tym odcinku,
 KR_{pi} – ograniczenia kierunku prądu (jeśli występują).

Warunki bezpiecznej eksploatacji statków typu WTTV podchodzących do nabrzeża serwisowego oraz statków WTIV podchodzących do nabrzeża instalacyjnego projektowanego portu do obsługi morskich farm wiatrowych w Świnoujściu można określić następująco:

- statki mogą wchodzić do portu zarówno dziobem, jak i rufą (od Obrotnicy Mielńskiej) oraz cumować do nabrzeży prawą lub lewą burtą,
- wejście, wyjście oraz cumowanie i odcumowywanie samodzielne bez asysty holowników,
- prędkość wiatru do $V_w = 12,5$ m/s,

- załadunek i rozładunek statku typu WTTV przy nabrzeżu serwisowym odbywa się przy wykorzystaniu dźwigów portowych lub w systemie *ro-ro* poprzez rampę dziobową albo rufową,
- załadunek statku WTIV przy nabrzeżu instalacyjnym odbywa się w systemie *jack-up* przez własny dźwig na statek stojący na nogach tego systemu. Wymaga to odpowiedniej głębokości przy nabrzeżu i konstrukcji dna.

Warunki bezpiecznej eksploatacji „statków maksymalnych” WTTV i WTIV na podejściowym torze wodnym (Obrotnica Mielnińska – akwen podejścia do nabrzeża można określić następująco:

$$W = \begin{matrix} & L_c & B & T & V^* & C & H \\ \begin{bmatrix} WTTV, & 180 \text{ m}, & 42,0 \text{ m}, & 7,0 \text{ m}, & 4-6 \text{ kn}, & -, & H \\ WTIV, & 170 \text{ m}, & 60,0 \text{ m}, & 7,5 \text{ m}, & 4-6 \text{ kn}, & -, & H \end{bmatrix} \end{matrix}$$

V^* – na odcinku Obrotnica Mielnińska – akwen podejściowy do nabrzeża należy przyjąć $V = 4$ kn, natomiast na odcinku toru wodnego Świnoujście – Szczecin od Obrotnicy Mielnińskiej do główek Portu Świnoujście należy przyjąć $V = 6$ kn.

Zbiór dopuszczalnych warunków hydrometeorologicznych dla „statków maksymalnych” odpowiednio wynosi:

$$H = \begin{matrix} \text{Pora doba} & s & \Delta h & V_w^* & KR_w & V_p^{**} \\ [d / n & 2 \text{ Mn} & 0,5 \text{ m} & 10 \text{ m/s} & b / o & 0,5 \text{ kn}] \end{matrix}$$

V^* – podczas wejścia do portu dopuszcza się zwiększenie prędkości wiatru do $V_w = 12,5$ m/s. Są to prędkości wiatru na akwenach portowych (Portu Świnoujście). Uwzględniając przesłonięcia i tłumienia wiatru na lądzie, przyjmuje się, że dopuszczalne prędkości wiatru na morzu są większe o około 3 m/s [14].

V_p^{**} – rozkłady prędkości prądów na Bocznej Świnie są podobne do rozkładów prędkości w Kanale Zbiórczym w rejonie Bazy Promów Morskich, przy czym wartości prędkości na Bocznej Świnie są mniejsze od prędkości na Kanale Zbiórczym o około 40% [14].

Warunki bezpiecznej eksploatacji „statków maksymalnych” typu WTTV stojącego przy nabrzeżu serwisowym można określić następująco:

$$W = \begin{matrix} & L_c & B & T_{port} & H_{port} \\ \begin{bmatrix} WTTV (Blue Azurit), & 178,3 \text{ m}, & 36,5 \text{ m}, & 7,0 \text{ m}, & H \\ WTTV (Big Roll), & 162,8 \text{ m}, & 42,0 \text{ m}, & 10,5 \text{ m}, & H \end{bmatrix} \end{matrix}$$

gdzie:

T_{port} – zanurzenie maksymalne statku przy nabrzeżu typu *Big Roll* w porcie podczas załadunku mogą zwiększyć swoje zanurzenie z $T = 6,5$ m do $T_{port} = 10,5$ m, co związane jest z procedurą załadunkową;

H_{port} – zbiór warunków hydrometeorologicznych dopuszczalnych dla „statku maksymalnego” podczas postoju przy nabrzeżu.

$$H_{port} = \begin{matrix} \Delta h & V_w & KR_w & V_p & KR_p \\ [0,75 \text{ m} & 18 \text{ m/s} & b / o & 0,2 \text{ kn} & \text{wzdłuż nabrzeża}] \end{matrix}$$

WARUNKI BEZPIECZNEJ EKSPLOATACJI STATKÓW W PROJEKTOWANYM PORCIE DO OBSŁUGI MORSKICH FARM WIATROWYCH W ŚWINOUJŚCIU

Podstawowy warunek bezpieczeństwa nawigacji stosowany w inżynierii ruchu morskiego przy projektowaniu dróg wodnych można zapisać następująco [6]:

$$\begin{matrix} \text{d}_{ijk(1-\alpha)} \subset \mathbf{D}(t) \\ \text{p}(x, y) \in \mathbf{D}(t) \end{matrix} \quad h(x, y, t) \geq T(x, y, t) + \Delta_{(1-\alpha)}$$

gdzie:

$\mathbf{D}(t)$ – dostępny akwen żeglugowy (zbiór punktów akwenu $p(x, y)$ spełniających warunek dostępnej głębokości $h(x, y, t)$ w momencie t),

$\text{d}_{ijk(1-\alpha)}$ – bezpieczny obszar manewrowy j -tego statku, wykonującego i -ty manewr w k -tych warunkach nawigacyjnych; zmienna losowa określana na poziomie ufności $(1-\alpha)$.

Powyższe warunki jednoznacznie określają, że na bezpieczeństwo nawigacji mają wpływ ograniczenia drogi wodnej w płaszczyźnie pionowej i poziomej. Ograniczenia te są ściśle związane z rodzajem wykonywanego manewru i panującymi warunkami nawigacyjnymi. Biorąc to pod uwagę, należy stwierdzić, że ustalenia warunków eksploatacji statków na morskich drogach wodnych jest ściśle związane z określeniem:

- rezerwy wody pod stępką statku manewrującego na drodze wodnej; wielkość tej rezerwy determinuje minimalną bezpieczną głębokość dostępnego akwenu żeglugowego drogi wodnej;
- szerokości bezpiecznego obszaru manewrującego statku przechodzącego drogą wodną; szerokość ta determinuje minimalną szerokość dostępnego akwenu żeglugowego drogi wodnej.

W przypadku torów wodnych warunek ten można zapisać następująco:

$$D_i(t) \geq d_{i(1-\alpha)}$$

gdzie:

$d_{i(1-\alpha)}$ – szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego dla „maksymalnego statku” wykonującego manewr przejścia i -tego odcinka toru w zadanych warunkach nawigacyjnych w j -tym punkcie osi toru określona na poziomie ufności $1-\alpha$,

D_i – dostępna szerokość i -tego odcinka toru wodnego w dnie gdzie spełniony jest warunek bezpiecznej głębokości $h_{xy} \geq T_{\max} + \Delta_{\max}$.

W przypadku przejścia statku drogą wodną z ładunkiem pokładowym wystającym poza obrysy burt statku istnieje możliwość uderzenia statku (ładunku pokładowego) w budowlę hydrotechniczną lub zacumowany statek nawet przy spełnieniu podstawowego warunku bezpieczeństwa nawigacji. W celu określenia takiego zagrożenia wprowadzono dodatkowy warunek bezpieczeństwa nawigacji:

$$D_i^{nad} \geq d_{i(1-\alpha)}^{nad}$$

gdzie:

$d_{i(1-\alpha)}^{nad}$ – nawodna szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego „statku maksymalnego” dla i -tego odcinka drogi wodnej określona na poziomie ufności $(1-\alpha)$,

D_i – nawodna szerokość dostępnego akwenu żeglugowego i -tego odcinka drogi wodnej ograniczona nadwodną infrastrukturą hydrotechniczną i parametrami cumujących przy mijanych nabrzeżach statków.

Nadwodną szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego określa się następująco:

$$d_{i(1-\alpha)}^{nad} = d_{i(1-\alpha)} + b_p + b_l$$

gdzie:

b_p – odległość końca ładunku pokładowego wystającego poza prawą burtę statku,

b_l – odległość końca ładunku pokładowego wystającego poza lewą burtę statku.

W przypadku torów wodnych zagrożenie wypadku występuje przeważnie z jednej strony toru. Charakteryzuje się ono najmniejszą nawodną odległością od osi toru wodnego do niebezpieczeństwa D_{inj}^{nad} .

W takim przypadku dodatkowy warunek bezpieczeństwa nawigacji można zapisać następująco:

$$D_{inj}^{nad} \geq d_{(1-a)} / 2 + b_j$$

gdzie:

D_{inj}^{nad} – najmniejsza nadwodna odległość od osi toru wodnego do niebezpieczeństwa w j -tą stronę na i -tym odcinku toru,

b_j – odległość ładunku pokładowego wystającego poza j -tą burtę statku.

Bezpieczne głębokości poszczególnych akwenów portowych określono według podstawowej zależności:

$$h_{bez} = T_{max} + \Delta_i$$

gdzie:

T_{max} – maksymalne zanurzenie statku na danym akwencie,

Δ_i – rezerwa wody pod stępką „maksymalnego statku” na badanym (i -tym) akwencie.

Bezpieczne głębokości wynoszą odpowiednio:

- podejściowy tor wodny $h_{bez} = 9,0$ m
- przy nabrzeżach serwisowym i instalacyjnym $h_{bez} = 12,0$ m.

Przy nabrzeżu instalacyjnym należy zastosować dodatkową rezerwę na wysokość stopy nogi systemu *jack-up*. Natomiast przy nabrzeżu serwisowym T_{max} jest zanurzeniem portowym T_{port} .

Szerokość bezpiecznych obszarów manewrowych statku typu *heavy lift* i *jack-up* określono metodą probabilistyczno-

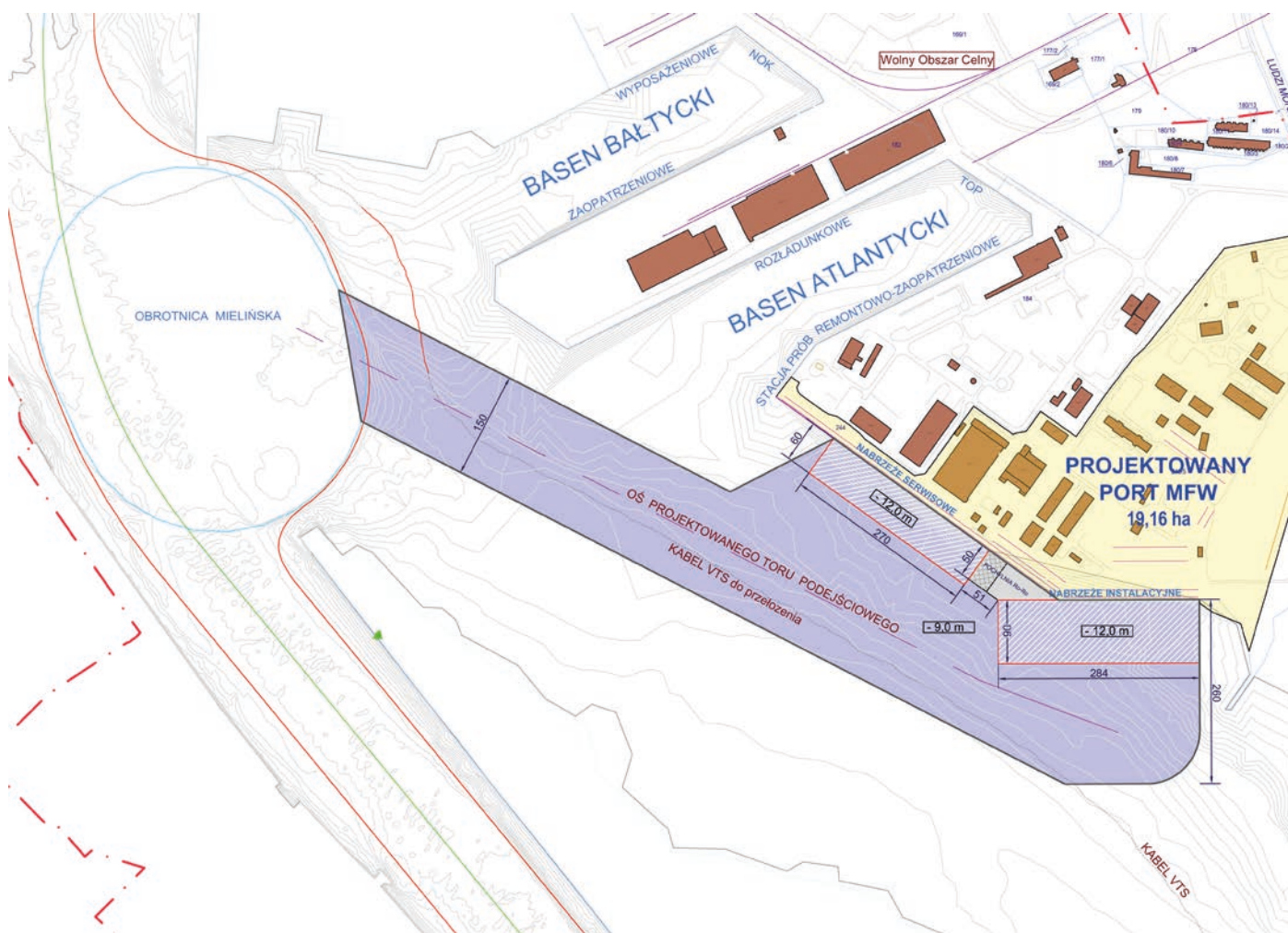
deterministyczną CIRM [7]. Dodatkowo, szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego załadowanego statku typu *heavy lift* zweryfikowano przy wykorzystaniu metody przeskalowania wyników badań symulacyjnych [8]. Przeskalowano wyniki badań symulacyjnych promu o parametrach $L_C = 230$ m, $B = 31,8$ m, $T = 6,3$ m i powierzchni nawiewu 6.450 podczas manewrów podejścia do stanowisk Nr 1 i Nr 2 Terminalu Promowego w Świnoujściu [14]. Jednostki te mają podobne współczynniki charakteryzujące ich manewrowość:

- k_m – współczynnika mocy napędu głównego przypadającego na 1 m długości statku,
- k_n – współczynnika mocy napędu głównego przypadającego na 1 m² bocznej powierzchni nawiewu.

Szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego załadowanych „statków maksymalnych” o szerokości $B = 60$ m określona na poziomie $(1-\alpha) = 0,95$ wynosi: $d_{0,95} = 135$ m. Minimalna bezpieczna szerokość podejściowego toru wodnego od Obrotnicy Mielńskiej do akwenów portowych po uwzględnieniu rezerwy na przysysanie wynosi:

$$D \approx 150 \text{ m}$$

Optymalne parametry akwenów portowych jednego z wariantów projektowanego portu do obsługi morskich farm wiatrowych w Świnoujściu przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wariant budowy portu do obsługi morskich farm wiatrowych w Świnoujściu

ANALIZA RYZYKA NAWIGACYJNEGO WYJŚCIA ZAŁADOWANEGO STATKU TYPU JACK-UP Z PORTU DO OBSŁUGI MORSKICH FARM WIATROWYCH W ŚWINOUJŚCIU

Największe ryzyko nawigacyjne stwarza wychodzący z portu do obsługi morskich farm wiatrowych w Świnoujściu załadowany „maksymalny statek” typu *jack-up* o następujących parametrach:

- $L_C = 170$ m
- $B = 60$ m
- $B_{nadw} = 110$ m
- $T = 7,5$ m

Ładunkiem pokładowym tego statku są między innymi łopaty turbin wiatrowych o długości 110 m ładowane w poprzek osi symetrii statku. Łopaty te mogą być ładowane na pokład symetrycznie (centralnie) lub asymetrycznie. W przypadku symetrycznego załadunku łopat szerokość nadwodna statku z ładunkiem wynosi $B_{nadw} = 110$ m, a odległość końca łopat od osi symetrii statku wynosi $x_{nadw}^j = 55$ m. W przypadku asymetrycznego załadunku łopat $B_{nadw} = 110$ m, a odległość końca łopat od osi symetrii w stronę jednej z burt wynosi $x_{nadw}^j = 80$ m. Należy zaznaczyć, że burta, na którą asymetrycznie załadowane są łopaty, jest zmienna (zależy od wykonywanych prac przy montażu MTW).

W inżynierii ruchu morskiego, podobnie jak w większości zastosowań inżynierskich, ryzyko R definiuje się jako możliwość powstania strat w określonym przedziale czasu i wyraża się je w postaci iloczynu prawdopodobieństwa wypadku i strat powstałych w jego wyniku. Dodatkowo definicję ryzyka uzupełniono o częstotliwość wykonywania badanego manewru (manewru zagrożonego wypadkiem określonego rodzaju). Zakładając, że wypadek i jego skutki są zdarzeniami niezależnymi, ryzyko nawigacyjne można przedstawić w postaci iloczynu [6]:

$$R_i = \sum_{q=1}^m P_{Ai q} I_{Ri} S_{iq}$$

gdzie:

- $P_{Ai q}$ – prawdopodobieństwo wystąpienia q -tego rodzaju wypadku nawigacyjnego na i -tym odcinku drogi wodnej,
- I_{Ri} – roczna częstość wykonania danego manewru na i -tym odcinku drogi wodnej,
- S_{iq} – skutki q -tego rodzaju wypadku na i -tym odcinku drogi wodnej.

Scenariusze awaryjne (rodzaje wypadków) precyzowane są dla manewrów wykonywanych przez statki danego rodzaju i wielkości na podstawie analizy zagrożeń i statystyk wypadków na określonych akwenach. Determinowane są one przez przyczyny wypadków dla każdego ich rodzaju. Scenariusze awaryjne nie uwzględniają pomyłek nawigacyjnych popełnianych przez ludzi, które zaliczane są do błędów grubych. Uwzględniają natomiast błędy przypadkowe i systematyczne wszelkiego rodzaju pomiarów i ocen nawigacyjnych oraz niedokładności manewrowych popełnianych przez nawigatora o określonych kwalifikacjach w trakcie manewrowania statkiem.

Biorąc powyższe pod uwagę, należy przyjąć następujące scenariusze awaryjne statku typu *jack-up* wychodzącego z portu bez asysty holowników:

1. Uderzenie w budowlę hydrotechniczną:
 - przekroczenie dostępnej odległości do budowli hydrotechnicznej przez ładunek pokładowy statku na podejściowym torze wodnym (nabrzeże instalacyjne – Obrotnica Mielńska).
2. Uderzenie w zacumowany statek:
 - przekroczenie dostępnej odległości do zacumowanego statku przez ładunek pokładowy statku typu *jack-up* podczas przejścia torem wodnym Świnoujście – Szczecin od Obrotnicy Mielńskiej do pary pław „15” – „16”.
3. Kolizja z innym statkiem:
 - mijanie na torze wodnym z innym statkiem (idącym kontrakursem).

Scenariusz awaryjny typu kolizja z innym statkiem na torze wodnym zależy wyłącznie od systemu regulacji ruchu w Porcie Świnoujście i nie będzie tu rozpatrzony. W dalszej części opracowania zajęto się określeniem wyłącznie ryzyka przekroczenia dostępnej odległości przez ładunek pokładowy statku do budowli hydrotechnicznych lub zacumowanego statku. Prawdopodobieństwo takiego wypadku można określić, znając bezpieczny obszar manewrowy badanego statku manewrującego na akwenie danej drogi wodnej w dopuszczalnych warunkach hydrometeorologicznych.

Prawdopodobieństwo bezwypadkowego wykonania manewru statku danego rodzaju i wielkości, w określonych warunkach nawigacyjnych i hydrometeorologicznych, kierowanego przez nawigatora o określonych kwalifikacjach wynosi:

$$P_{nj} = P(X_j \leq D_{jn})$$

a wyrażone przy pomocy rozkładu normalnego standaryzowanego [5]:

$$P_{nj} = P\left(\frac{X_j - \bar{x}_j}{\delta_j} \leq \frac{D_{nj} - \bar{x}_j}{\delta_j}\right)$$

gdzie:

- X_j – maksymalna odległość skrajnego punktu statku w j -tym kierunku od osi drogi wodnej (zmienna losowa),
- $\bar{x}_j, \delta_j$ – wartość średnia i odchylenie standardowe maksymalnych odległości skrajnych punktów statku w j -tym kierunku od osi toru wodnego,
- D_{nj} – najmniejsza odległość od niebezpieczeństwa w j -tym kierunku od osi toru wodnego.

Parametry rozkładu $\bar{x}_j, \delta_j$ są obliczone na podstawie przeprowadzonych badań rzeczywistych, symulacyjnych lub empirycznych danego manewru, które służą do określania parametrów bezpiecznego obszaru manewrowego. Obliczenie parametrów bezpiecznego obszaru manewrowego wykonywane metodą symulacyjną lub metodą probabilistyczno-deterministyczną CIRM przeprowadza się na określonym poziomie ufności.

Prawdopodobieństwo wypadku w ciągu roku spowodowanego przekroczeniem dostępnego akwenu żeglugowego przez maksymalny statek na i -tym odcinku portowej drogi wodnej określono następującą zależnością [6]:

$$P_{wi} = P_{ai} \cdot I_r \cdot \Delta t_i / G_r \quad [\text{rok}^{-1}]$$

a do obliczeń prawdopodobieństwa wypadku wybierane jest maksymalne prawdopodobieństwo przekroczenia dostępnego akwenu żeglugowego ze zbioru niebezpiecznych kierunków:

$$P_{ai} = \max_j P_{aij}$$

gdzie:

P_{wi} – prawdopodobieństwo wypadku w ciągu roku spowodowanego przekroczeniem dostępnego akwenu żeglugowego przez badany statek na i -tej drodze wodnej,

P_{ai} – maksymalne prawdopodobieństwo przekroczenia dostępnego akwenu żeglugowego przez bezpieczny obszar manewrowy badanego statku,

I_r – średnia roczna intensywność wykonania manewru przejścia badanego statku przez i -ty odcinek toru [rok⁻¹],

Δt_i – średni czas wykonania manewru przejścia i -tego odcinka toru przez badany statek [h],

G_r – liczba godzin w roku (8 760 h).

Ryzyko nawigacyjne jest często utożsamiane z rocznym prawdopodobieństwem wystąpienia danego rodzaju wypadku dla określonych skutków (wyznacznika skutków) [4, 9].

Na portowych drogach wodnych do wypadków, w których mogą wystąpić ofiary śmiertelne, należy wyłącznie uderzenie przechodzącego statku torem wodnym w przycumowany prom lub inny statek pasażerski. W przypadku gdy którykolwiek ze scenariuszy wypadków zakłada ofiary śmiertelne w ludziach, należy go rozpatrywać oddzielnie przed analizą ryzyka przejścia statku przez badany system dróg wodnych. Ryzyko wypadku, w których zagrożone jest życie ludzkie ze skutkiem śmiertelnym, określone jest według następującej zależności:

$$R_s = P_A P_{sp}$$

gdzie:

R_s – ryzyko wypadku skutkującego śmiercią człowieka,

P_A – prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku, w którym zagrożone jest życie ludzkie,

P_{sp} – prawdopodobieństwo śmierci człowieka w wyniku wypadku.

Warunkiem akceptacji wypadku ze skutkiem śmiertelnym jest spełnienie zależności:

$$R_s \leq R_{s\text{ akc}}$$

gdzie:

$R_{s\text{ akc}}$ – ryzyko akceptowalne wypadku ze skutkiem śmiertelnym.

Ryzyko akceptowalne wypadku ze skutkiem śmiertelnym w żegludze przyjmowane jest na poziomie [4]:

- dla członka załogi $R_{s\text{ akc}} = 1 \cdot 10^{-4}$ [rok⁻¹]
- dla pasażera lub grupy członków załogi $R_{s\text{ akc}} = 1 \cdot 10^{-5}$ [rok⁻¹]
- dla grupy pasażerów $R_{s\text{ akc}} = 1 \cdot 10^{-6}$ [rok⁻¹]

Tabl. 1. Charakterystyka transportowa wybranego „statku średniego” WTIV

Statek WTIV 4600m ²	
Łączna moc farmy [W]	6 000 000 000
Moc jednostkowa turbiny [W]	14 000 000
Łączna liczba turbin	429
Czas budowy [lata]	5
Liczba instalowanych turbin rocznie	86
Liczba kompletnych zestawów turbin na statku WTIV	4
Liczba wejść w roku	21

Należy zaznaczyć, że do analizy ryzyka uwzględniającego skutki ekonomiczne można przystąpić, gdy będzie spełniony warunek ryzyka uwzględniający śmierć człowieka.

Podczas przejścia załadowanego statku typu *jack-up* torem wodnym Świnoujście – Szczecin istnieje ryzyko śmierci człowieka przy mijaniu Terminalu Promowego w Świnoujściu.

Średnia roczna liczba wyjść z portu załadowanego statku typu *jack-up* określono na podstawie charakterystyk transportowych „statku średniego” $I_r = 21$ [rok⁻¹] (patrz tabl. 1).

Prawdopodobieństwo uderzenia statku typu *jack-up* w przycumowany prom $L_C = 230$ m do zmodernizowanego stanowiska Nr 2 Terminalu Promowego w Świnoujściu (odległość do osi toru $D_{\min} = 100$ m) wynosi:

- przy symetrycznym załadunku łopat – $R^s = 3 \cdot 10^{-7}$ [rok⁻¹],
- przy asymetrycznym załadunku łopat – $R^a = 1 \cdot 10^{-6}$ [rok⁻¹].

Prawdopodobieństwo uderzenia przechodzącego torem wodnym Świnoujście – Szczecin statku (typu *jack-up*) w prom $L_C = 230$ m cumujący przy stanowisku Nr 2 Terminalu Promowego w Świnoujściu (przy założeniu, że stanowisko Nr 2 jest zajęte przez 24 godziny na dobę) wynosi $P^a = 1 \cdot 10^{-6}$ [rok⁻¹]. Na stanowisku Nr 2 docelowo planowana jest obsługa 4 promów, których średni czas postoju wynosi 4 godziny. Oznacza to, że stanowisko Nr 2 jest zajęte w ciągu doby przez 16 godzin, a współczynnik zajętości stanowiska wynosi 0,67. W takim układzie planowanego obciążenia (zajętości) stanowiska Nr 2 roczne prawdopodobieństwo uderzenia statku typu *jack-up* przechodzącego torem wodnym w stojący prom ($L_C = 230$ m) przy stanowisku Nr 2 Terminalu Promowego w Świnoujściu wynosi:

$$P^{a'} = 6,7 \cdot 10^{-7} \text{ [rok}^{-1}\text{]}$$

Energia kinetyczna uderzenia statku w prom jest stosunkowo duża ($V \approx 6$ węzłów), co prawdopodobnie spowoduje uszkodzenie trapu i rampy. Skutkiem takiego wypadku może być śmierć pasażerów znajdujących się na trapie. Biorąc pod uwagę, że pasażerowie podczas postoju promu są okrętowani i wyokrętowani w połowie czasu jego postoju, to prawdopodobieństwo śmierci pasażerów znajdujących się na trapie podczas wypadku wynosi: $P_{sp} = 0,5$ a ryzyko śmierci grupy pasażerów w ciągu roku w wypadku uderzenia statku w cumujący prom wynosi:

$$R_{sp}^a = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ [rok}^{-1}\text{]}$$

i jest mniejsze od ryzyka akceptowalnego:

$$R_{sp}^a < R_{s\text{ akc sp}}$$

W związku z powyższymi warunkami bezpiecznej eksploatacji „maksymalnych statków” typu *jack-up* przechodzących torem wodnym Świnoujście – Szczecin podczas cumowania promu $L_C = 230$ m przy zmodernizowanym stanowisku Nr 2 Terminalu Promowego w Świnoujściu należy uznać za akceptowalne.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono projekt portu do obsługi morskich farm wiatrowych w Świnoujściu. Port ten będzie obsługiwał nietypowe statki typu *jack-up* do instalacji morskich tur-

bin wiatrowych o mocy 14 MW. Statki te podczas załadunku w systemie *jack-up* stoją na 4 nogach tego systemu i załadowują się własnym dźwigiem o udźwigu do 3 000 ton. Ładunkiem pokładowym takiego statku mogą być elementy turbin ładowane w poprzek osi symetrii, a jego nadwodna szerokość może osiągnąć 110 m.

Określenie parametrów akwenów portowych dla statków typu *jack-up*, warunków ich bezpiecznej eksploatacji oraz ryzyka nawigacyjnego przejścia torów wodnych wymagało opracowania specjalnych metod zaprezentowanych w artykule.

Istnieje możliwość uniknięcia ryzyka poprzez taką synchronizację okretowania pasażerów, aby nie odbywało się ono w trakcie wychodzenia statku z ładunkiem wystającym poza obrys statki, co zminimalizuje prawdopodobieństwo zaistnienia tego rodzaju wypadku do 0.

LITERATURA

1. Anju Mark: Installation Vessel Design. Wind Europe Conference & Exhibition, Innovations for LCOE reduction in offshore wind energy – technologies, models and strategies, 28-30 listopada 2017. Amsterdam 2017.
2. Energetyka wiatrowa. Słownictwo techniczne. zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/inzynieria_srodowiska/c_odnaw_zrodla_en/files/slowka.htm, 2020.
3. Gospodarka morską. <https://www.gospodarkamorska.pl/stocznie-offshore-najwieksza-turbina-wiatrowa-na-swiecie-stanela-w-porcie-rotterdam-46421>, 2019.
4. Gucma L.: Wytyczne do zarządzania ryzykiem morskim. Wydawnictwo Naukowe AM w Szczecinie, 2009.
5. Gucma S. i inni.: Morskie drogi wodne – projektowanie i eksploatacja w ujęciu inżynierii ruchu. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej. Gdańsk 2015.
6. Gucma S. i inni.: Inżynieria Ruchu Morskiego. Wytyczne do projektowania morskich dróg wodnych i portów oraz warunków ich bezpiecznej eksploatacji. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej. Gdańsk 2017.
7. Gucma S. i inni.: Nawigacja Pilotażowa. Nawigacja na akwenach ograniczonych. Wydawnictwo Naukowe AM w Szczecinie, 2019.
8. Gucma, S., Gralak, R.: Probabilistic-Deterministic Method of Rescaling Ship Manoeuvring Simulation Data Defining Parameters of Fairway Bends. *New Trends in Production Engineering*, 1(1), 2018, 127-133.
9. Gucma, S., Gralak, R., Muczyński, B.: Areas of emergency maneuvers and the navigational risk of accidents in fairways due to ship technical failures determined by the ship movement simulation method. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin* 61 (133) 2020.
10. JanDeNul: Voltaire. Offshore Jack-up Installation Vessel. www.jandenu.com/sites/default/files/2020-10/Voltaire%20%28EN%29_1.pdf, 2020.
11. Naschert Camilla: Global shortage of installation vessels could trouble waters for offshore wind. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/global-shortage-of-installation-vessels-could-trouble-waters-for-offshore-wind-56000511>, 2019.
12. Pei: Global offshore wind turbine installation vessel database released. <https://www.powerengineeringint.com/renewables/wind/global-offshore-wind-turbine-installation-vessel-database-released/>, 2020.
13. Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej: Przyszłość morskiej energetyki wiatrowej w Polsce. Raport PSEW. Szczecin 2019.
14. Raport Akademii Morskiej w Szczecinie: Modernizacja stanowiska Nr 2 Terminalu Promowego w Świnoujściu umożliwiającą obsługę promu o długości 230 m. Analiza nawigacyjna, 2020.
15. Rystadenergy: The world may not have enough heavy lift vessels to service the offshore wind industry post 2025. <https://www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/the-world-may-not-have-enough-heavy-lift-vessels-to-service-the-offshore-wind-industry-post-2025/> 2020.
16. Ulstein: Securing your future in offshore wind. ulstein.com/news/2019/securing-your-future-in-offshore-wind, 2019.
17. WUPROHYD: „Koncepcja budowy portu do instalacji i serwisowania Morskich Farm Wiatrowych (MFW). Uproszczona koncepcja techniczno-programowa. Gdynia 2020.