

Stanisław Gucma
Akademia Morska w Szczecinie

POZIOM UFNOŚCI PRZY PROJEKTOWANIU DRÓG WODNYCH TERMINALI LNG

Streszczenie: W artykule zaprezentowano probabilistyczny model ruchu statku na torze wodnym, który zastosowano do określenia prawdopodobieństwa wejścia statku na skarpę toru wodnego. Wykorzystując pojęcie ryzyka nawigacyjnego oraz prawdopodobieństwo wejścia gazowca na skarpę toru wodnego określono poziom ufności, który należy przyjąć jako bezpieczny przy projektowaniu dróg wodnych terminalu LNG.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo nawigacji, terminale LNG, manewrowanie gazowców LNG.

1. WPROWADZENIE

Zapewnienie bezpieczeństwa nawigacji gazowca LNG na akwenach ograniczonych stwarza szereg problemów technicznych i organizacyjnych na etapie projektowania terminali LNG oraz ich eksploatacji. Problemy te związane są z zagrożeniami, jakie stwarza przewożony ładunek oraz sam statek o specyficznych parametrach.

Manewrowanie gazowcem LNG o długości 250 m ÷ 350 m i dużej powierzchni nawiewu (maksymalna wysokość nadwodna osiąga 60 m) na akwenach ograniczonych to skomplikowane przedsięwzięcie wymagające określonych rozwiązań z zakresu inżynierii ruchu morskiego.

Zapewnienie odpowiednio wysokiego poziomu bezpieczeństwa manewrowania gazowców na drogach wodnych prowadzących do terminali LNG jest podstawowym zadaniem, które należy rozwiązać przy projektowaniu terminali i określeniu ich warunków eksploatacji. Zadanie to sprowadza się do określenia parametrów bezpiecznego akwenu manewrowego dla podejściowych dróg wodnych. Parametry bezpiecznego akwenu manewrowego można określić wykorzystując model probabilistyczny.

Statek może bezpiecznie manewrować jedynie na akwenu, który w każdym punkcie spełnia warunek wymaganej głębokości. Akwen taki nazywany jest dostępnym akwem żeglugowym, który można przedstawić w postaci obszaru \mathbf{D} zbioru punktów spełniających warunek wymaganej głębokości w momencie t .

Statek wykonujący dany manewr na dostępnym akwenu żeglugowym w czasie trwania tego manewru zajmuje określony obszar wyznaczony przez jego kolejne położenia na tym akwenu. Parametry tego obszaru mają charakter losowy i zależą od wielu różnorodnych czynników. Obszar ten, obliczony na określonym poziomie ufności $(1 - \alpha)$, nazywa się bezpiecznym akwem manewrowym (\mathbf{d}) [3].

Tak zdefiniowany bezpieczny akwen manewrowy można przedstawić w postaci obszaru \mathbf{d}_{ijk} (zbioru punktów), a podstawowy warunek bezpieczeństwa nawigacji zapisać następująco:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{d}_{ijk}(1 - \alpha) \subset \mathbf{D}(t) \\ \bigwedge_{p(x, y) \in \mathbf{D}(t)} h(x, y, t) \geq T(x, y, t) + \Delta(x, y, t) \end{array} \right\}$$

gdzie:

- $\mathbf{D}(t)$ – dostępny akwen żeglugowy (spełniony warunek bezpiecznej głębokości w momencie t),
- $\mathbf{d}_{ijk}(1 - \alpha)$ – bezpieczny akwen manewrowy na poziomie ufności $1 - \alpha$.

Z powyższych rozważań wynika, że zapewnienie bezpieczeństwa nawigacji gazowców LNG na podejściowych drogach wodnych do terminali LNG jest ściśle związane z doбором odpowiedniego (bezpiecznego) poziomu ufności przy określaniu parametrów tych dróg wodnych.

2. PRAWDOPODOBIENSTWO WYPADKU NAWIGACYJNEGO NA TORACH WODNYCH

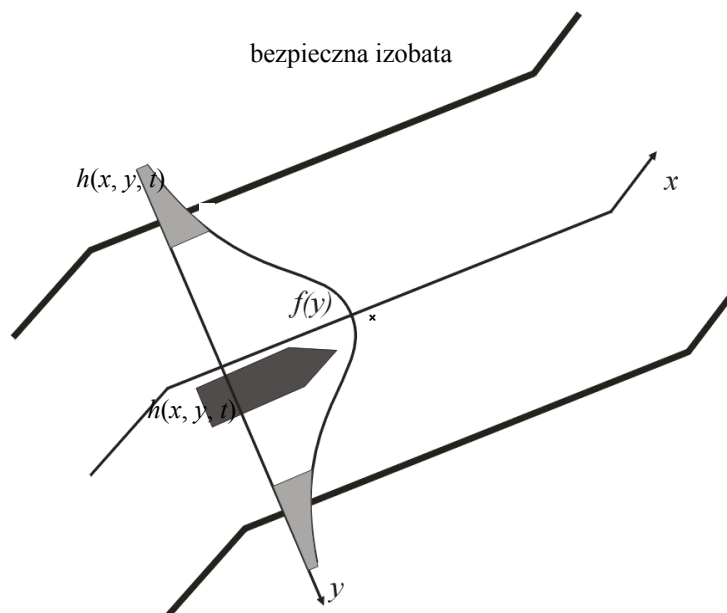
W modelu probabilistycznym szerokość bezpiecznego akwenu manewrowego jest zmienną losową. Do opisu tego parametru przyjmuje się najczęściej rozkład normalny wykazujący dużą zgodność z rzeczywistością (Rys. 1). Rozkład odległości skrajnych punktów akwenu manewrowego od środka toru wodnego można wyrazić w postaci [1]:

$$d_l(y) = \frac{1}{\delta_l \sqrt{2\Pi}} e^{-\frac{(y-m_l)^2}{2\delta_l^2}}$$

$$d_p(y) = \frac{1}{\delta_p \sqrt{2\Pi}} e^{-\frac{(y-m_p)^2}{2\delta_p^2}}$$

gdzie:

- $d_l(y); d_p(y)$ – odległości od środka toru wodnego do lewej i prawej granicy akwenu manewrowego,
- $m_l; \delta_l$ – średnia i odchylenie standardowe odległości od środka toru wodnego do lewej granicy akwenu manewrowego,
- $m_p; \delta_p$ – średnia i odchylenie standardowe odległości od środka toru wodnego do prawej granicy akwenu manewrowego.



Rys. 1. Szerokość bezpiecznego akwenu manewrowego w modelu probabilistycznym

Zbiory punktów dostępnego akwenu żeglugowego $\mathbf{D}(t)$, jak i bezpiecznego akwenu manewrowego $\mathbf{d}_{ijk}(1-\alpha)$ można utożsamić z obszarami o określonych parametrach liniowych. Na drogach wodnych wielu typów podstawowymi parametrami liniowymi tych obszarów decydującymi o bezpieczeństwie wykonania badanego manewru są ich szerokości. W związku z powyższym warunek bezpiecznego wykonania określonego manewru można przekształcić do następującej postaci:

$$D(t)_{ijk} \geq d_{ijk}(1-\alpha)$$

gdzie:

- $D(t)_{ijk}$ – szerokość dostępnego akwenu żeglugowego w momencie t (dostępny akwen dla żeglugi i -tego statku wykonującego j -ty manewr w k -tych warunkach nawigacyjnych);
- $d_{ijk}(1-\alpha)$ – szerokość bezpiecznego akwenu manewrowego i -tego statku, wykonującego j -ty manewr w k -tych warunkach nawigacyjnych określony na poziomie ufności $1-\alpha$.

Prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku przy wykonaniu określonego manewru (przejścia torem wodnym) można przedstawić w postaci:

$$P_A = 1 - P_n P_t$$

gdzie:

P_n – prawdopodobieństwo tego, że statek o określonych parametrach, kierowany przez nawigatora o określonych kwalifikacjach, nie będzie miał wypadku przy wykonywaniu danego manewru w określonych warunkach nawigacyjnych i hydrometeorologicznych;

P_t – prawdopodobieństwo niezawodnej pracy systemów i urządzeń okrętowych mających wpływ na bezawaryjne wykonanie danego manewru.

Prawdopodobieństwo wykonania bezkolizyjnego manewru statku danego typu, w określonych warunkach nawigacyjnych i hydrometeorologicznych, kierowanego przez nawigatora o określonych kwalifikacjach w pewnym okresie czasu i miejscu:

$$P_n = P(Y_j \leq d_j)$$

a prawdopodobieństwo wyrażone za pomocą rozkładu normalnego standaryzowanego [2]:

$$P_n = P\left(\frac{Y_j - \bar{y}_j}{\delta_j} \leq \frac{d_j - \bar{y}_j}{\delta_j}\right) = 1 - \alpha$$

gdzie:

Y_j – maksymalna odległość skrajnego punktu statku na lewo lub prawo od osi toru w j -tym pasie akwenu (zmienna losowa),

\bar{y}_j, δ_j – wartość średnia i odchylenie standardowe maksymalnych odległości skrajnych punktów statku na lewo lub prawo od osi toru dla j -tego pasa akwenu,

d_j – najmniejsza odległość od niebezpieczeństwa w j -tym pasie akwenu.

Parametry rozkładu \bar{y}_j, δ_j są obliczone na podstawie przeprowadzonych badań rzeczywistych lub symulacyjnych danego manewru, które służą do określania szerokości pasa ruchu.

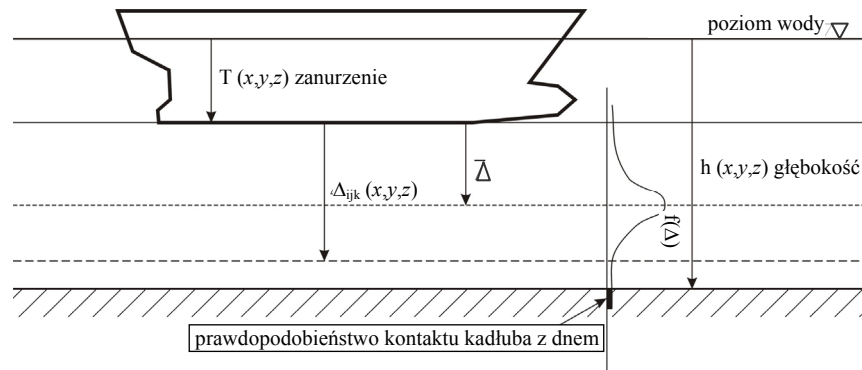
Niezawodność techniczną utożsamiono z bezawaryjnym wykonaniem określonego manewru. Zależy ona od niezawodnej pracy: silnika głównego, silników pomocniczych z generatorami, urządzenia sterowego, holowników, a także radarów – w przypadku złej widzialności [2].

W modelu rezerwa wody pod stępką jest zmienną losową, a prawdopodobieństwo kontaktu kadłuba z dnem można zapisać w postaci [5] (Rys. 2):

$$P(T \geq h) = \int_h^{\infty} f(\Delta) d\Delta$$

gdzie:

- $f(\Delta)$ – gęstość rozkładu rezerwy wody pod stępką,
- h – głębokość akwenu,
- T – zanurzenie statku.



Rys. 2. Rozkład rezerwy wody pod stępką

Biorąc pod uwagę niezależność niezawodności nawigacyjnej, technicznej oraz rezerwy wody pod stępką prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku statku na torze wodnym przy zastosowaniu tego modelu można przedstawić w postaci:

$$P_A = 1 - P_n P_t P(T > h)$$

3. POZIOM UFNOŚCI

Ryzyko nawigacyjne wyrażone jest w postaci iloczynu prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku i skutków, jakie on spowoduje. Dodatkowo definicję ryzyka uzupełniono o częstotliwość względną wykonywania badanego manewru. Zakładając, że wypadek i jego skutki są zdarzeniami niezależnymi, ryzyko nawigacyjne można przedstawić w postaci iloczynu [4]:

$$R = I_R P_A S$$

gdzie:

- I_R – średnia roczna intensywność (częstość) wykonywania danego manewru,
- P_A – prawdopodobieństwo wystąpienia określonego wypadku,
- S – skutki, jakie spowoduje ten wypadek.

Przy czym należy zauważyć, że iloczyn $I_R P_A$ jest prawdopodobną liczbą wystąpienia określonego wypadku w roku.

Na podstawie definicji ryzyka nawigacyjnego określono warunek bezpiecznej nawigacji:

$$R_{akc} \geq R$$

po przekształceniu:

$$R_{akc} \geq I_R P_A S$$

gdzie:

R_{akc} – akceptowalne ryzyko wykonania określonego manewru.

Po podstawieniu i przekształceniu otrzymano poziom ufności ograniczony następującą nierównością:

$$1 - \alpha \geq \frac{1 - \frac{R_{akc}}{I S}}{P_t P(T > h)}$$

Skutki powstałe podczas wejścia statku na mieliznę (skarpe toru wodnego) zależą od takich czynników, jak maksymalna energia statku w momencie kontaktu z dnem ($E(t)$) i dopuszczalna energia bezpiecznego kontaktu statku z dnem (E_d). Można je przedstawić w następującej postaci [4]:

$$S = \frac{E(t)}{E_d}$$

gdzie:

$E(t)$ – maksymalna energia statku w momencie kontaktu kadłuba z dnem,

E_d – dopuszczalna energia bezpiecznego kontaktu statku z dnem.

W przypadku, gdy wartość S zawiera się w przedziale $0 < S \leq 1$ – wypadek nie powoduje istotnych strat, a statek jest w stanie samodzielnie zejść z mielizny (lub za pomocą manewrujących z nim holowników) bez uruchamiania specjalnej akcji ratowniczej i bez uszkodzenia kadłuba. Natomiast gdy $S > 1$, w wyniku wypadku występują uszkodzenia kadłuba statku, a w celu jego ściągnięcia z mielizny należy podejmować specjalną akcję ratowniczą wiążącą się z nakładami finansowymi (ze wstrzymaniem ruchu, ze sprzętem itp.).

Przez pojęcie „maksymalna energia statku przy kontakcie kadłuba z dnem” należy rozumieć energię kinetyczną, którą statek może posiadać w momencie uderzenia o dno lub wejście na mieliznę w najmniej korzystnych warunkach nawigacyjnych podczas wykonywania badanego manewru. Energię tę można oszacować na podstawie badań symulacyjnych danego manewru statku, na określonym akwenie ograniczonym, w badanych warunkach hydrometeorologicznych.

Bibliografia

1. Gucma L., *Modelowanie czynników ryzyka zderzenia jednostek pływających z konstrukcjami portowymi i pełnomorskimi*. Studia nr 44, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2005.
2. Gucma S., *Inżynieria ruchu morskiego*. Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk 2001.
3. Gucma S., *Nawigacja pilotażowa*. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2004.
4. Gucma S., Gucma L., Zalewski P., *Symulacyjne metody badań w inżynierii ruchu morskiego*. Pod redakcją S. Gucmy. Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2008.
5. Gucma S. i inni, *Projektowanie i eksploatacja terminali LNG w aspekcie bezpieczeństwa nawigacji*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2009.

CONFIDENCE LEVEL IN DESIGNING WATERWAYS TO LNG TERMINALS

Abstract: A probabilistic model of ship movement in a fairway will be presented. The model was used to determine the probability of ship's grounding on the fairway slope. The confidence level that should be adopted as safe while designing LNG terminal waterways was defined using the concept of navigational risk and the probability that a gas carrier will ground on the fairway slope.

Keywords: navigational safety, LNG terminals, LNG carrier manoeuvring