

Waldemar UCHACZ¹

WPLYW STOPNIA ODWZOROWANIA WYBRANYCH PARAMETRÓW MODELU RUCHU STATKÓW NA UZYSKIWANE WYNIKI

Transport wodny należy do najefektywniejszych środków transportu. Na akwenach trudnych nawigacyjnie i o dużym natężeniu ruchu, wprowadza się systemy VTS - Vessel Traffic Service, sprawujące nadzór i koordynację ruchu statków. Znajomość aktualnej sytuacji na torze oraz ruchu planowanego w zadanej perspektywie czasowej, pozwala wypracować optymalne strategie ruchu. W artykule przedstawiono model optymalnego planowania ruchu statków dla toru wodnego Świnoujście-Szczecin, w dwóch wariantach jego złożoności. Dokonano oceny możliwości wykorzystania obu wariantów modelu.

THE INFLUENCE OF SOME PARAMETERS OF MAPPING VESSEL TRAFFIC MODEL FOR THE OBTAINED RESULTS

Water transport is one of the most effective means of transport. On waters for navigation difficulties and heavy traffic, are introduced VTS systems - Vessel Traffic Service, supervising and coordinating ships Traffic. Knowledge of the current situation on the track and the planned traffic set time term, helps to develop optimal traffic strategies. The article presents a model of optimal planning for traffic on route Swinoujście-Szczecin, on two variants of its complexity. It performed an assessment of the ability to use both variations

1. WSTĘP

Wyznaczenie optymalnej trajektorii ruchu statku na torze przy ograniczeniach wynikających z ruchu innych statków można potraktować jako problem teorii sterowania: wyznaczyć $v_i(t)$, przy spełnieniu ograniczeń tak, by minimalizować łączny czas oczekiwania statku na wejście na tor i przejścia toru. Statek jest jednak obiektem, dla którego sterowanie prędkością, zwłaszcza w krótkich odstępach czasu, jest trudno realizowalne. Z drugiej strony, minimalizacja czasu przejścia statku torem wodnym prowadzi do maksymalizacji jego prędkości. W tej sytuacji można przyjąć założenie, że statek na torze porusza się z prędkościami maksymalnymi dopuszczalnymi dla danego odcinka toru (uproszczony wariant modelu). Jest to założenie odzwierciedlające rzeczywistą praktykę w ruchu statków. Czynnikiem warunkującym pożądane położenie statku na torze jest w tej sytuacji nie bezwzględne przestrzeganie założonych prędkości, ale

¹ Akademia Morska w Szczecinie; ul. Wały Chrobrego 1; 70-500 Szczecin. Tel. +48 91 48-09-391, Fax. +48 91 48-09-466, E-mail: w.uchacz@am.szczecin.pl.

czas pokonywania odpowiednich odcinków toru. Dzięki temu, kapitan (pilot) statku ma możliwość manewrowania prędkością tak, by statek pokonywał newralgiczne punkty toru w wyznaczonych momentach czasu.

Przyjęto, że wzdłuż toru obowiązują zmienne zasady ruchu. Mogą one wynikać ze zmiennych warunków hydrotechnicznych: głębokości i szerokości toru oraz charakteru akwenu (odcinek prostoliniowy, zakole, itp.). Z tego względu tor dzielony jest na odcinki o stałych warunkach ruchu.

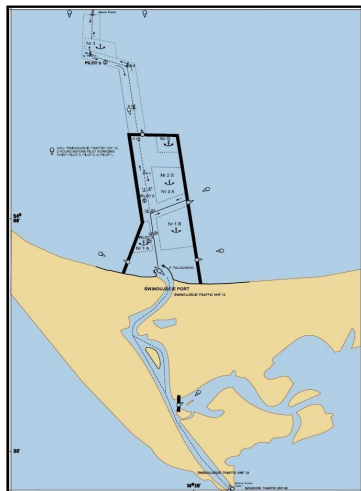
Warunki ruchu statku zależą jednocześnie od jego parametrów. Najczęściej uzależnia się je od długości i zanurzenia statku [1]. Uwzględniając te kryteria przyjęto podział statków na grupy [5]. Przyjmując powyższe założenie, opracowano model matematyczny ruchu statków na torze wodnym. Umożliwia on wypracowanie optymalnej strategii ruchu statków. Model umożliwia rozwiązanie zadania statycznego – wyznaczenie czasu wejścia każdego statku na tor przy spełnieniu zadanych ograniczeń. Model należy do klasy modeli programowania matematycznego całkowitoliczbowego liniowego mieszanego. Funkcja celu, zgodnie z rzeczywistym celem regulacji ruchu, minimalizuje łączny czas, który upływa od momentu zgłoszenia statku do wejścia na tor do momentu opuszczenia toru.

Przy założeniu, że statki poruszają się maksymalnymi dozwolonymi prędkościami, naturalnym kryterium optymalizacji jest minimalizacja łącznego czasu oczekiwania na wejście wszystkich statków (uproszczony wariant modelu). Tak sformułowany problem powoduje, że model jest przejrzysty, a przede wszystkim ma rozsądny wymiar. Takie założenie skutkuje jednak istotnym ograniczeniem: brakiem ingerencji w ruch statku znajdującego się na torze.

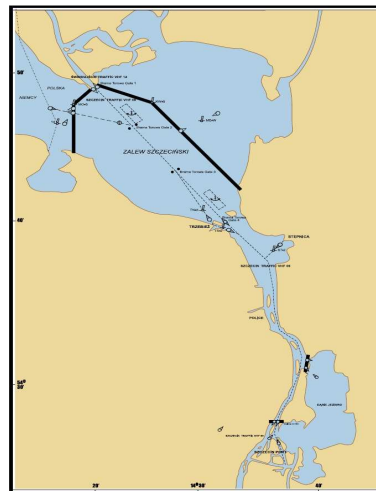
Jako drugi wariant (wariant rozszerzony) przedstawiono model, w którym oprócz zmiennych czasów oczekiwania na wejście statku na tor, przyjęto jako zmienne – prędkości statków na poszczególnych odcinkach toru.

2. CHARAKTERYSTYKA AKWENU, ZAŁOŻENIA MODELU

Tor wodny Świnoujście - Szczecin łączy Morze Bałtyckie (poprzez Zatokę Pomorską) z portami Szczecin, Świnoujście, Police. Nadzór i koordynację ruchu sprawują Kapitanaty Portu w Świnoujściu i Szczecinie. Na rys. 1 i 2 przedstawiono mapki akwenu z podziałem zakresu odpowiedzialności terytorialnej między kapitanatami.



Rys 1. Obszar nadzoru ruchu statków
Kapitanatu Portu Świnoujście
Źródło: www.ums.gov.pl



Rys 2. Obszar nadzoru ruchu statków
Kapitanatu Portu Szczecin
Źródło: www.ums.gov.pl

Dla toru przyjęto następujące założenia [2]:

- tor podzielony jest na odcinki, na których obowiązują stałe zasady: dopuszczalnych prędkości (minimalnych i maksymalnych), mijania się statków i wyprzedzania się statków,
- wartości dopuszczalnych prędkości na odcinku toru zależą od parametrów statków (długości i zanurzenia),
- kryteria dopuszczalności mijania się i wyprzedzania statków zależą od wzajemnych relacji parametrów statków (długości i zanurzenia),
- ruch statków znajdujących się na torze jest zdeterminowany (tzn. nie podlega optymalizacji, brany jest pod uwagę jedynie jako ograniczenie w ruchu innych statków).

W [2, 4] przedstawiono model matematyczny ruchu statków. Przyjęto w nim dodatkowo, że statki poruszają się ze stałymi, maksymalnymi (dopuszczalnymi przez Przepisy Portowe) prędkościami. Jako kryterium optymalizacji przyjęto minimalizację łącznego czasu oczekiwania wszystkich statków na przejście toru.

Na potrzeby konstruowanego tu modelu przyjęto następujące oznaczenia:

- T_i, T_j – rzeczywisty czas gotowości do wejścia na tor statków i -tego i j -tego,
 t_i, t_j – czasy oczekiwania statków i -tego i j -tego na wejście na tor,
 K – liczba odcinków toru: $r = 1, \dots, K$,
 h_{ik}, h_{jk} – czasy dojścia statków i -tego i j -tego do k -tego odcinka mijania, gdzie:

$$h_{ik} = \sum_{r=1}^{k-1} \frac{l_r}{v_{ir}^{\max}} \quad (1)$$

$$h_{jk} = \sum_{r=k}^K \frac{l_r}{v_{jr}^{\max}} \quad (2)$$

l_r – długość odcinka r -tego,

v_{ik}^{\max} – prędkość maksymalna i -tego statku na odcinku k -tym,

v_{jk}^{\max} – prędkość maksymalna j -tego statku na odcinku k -tym,

p_{ik}, p_{jk} – czasy przejścia k -tego odcinka odpowiednio przez statki i -ty i j -ty:

$$p_{ik} = \frac{l_k}{v_{ik}^{\max}} \quad (3)$$

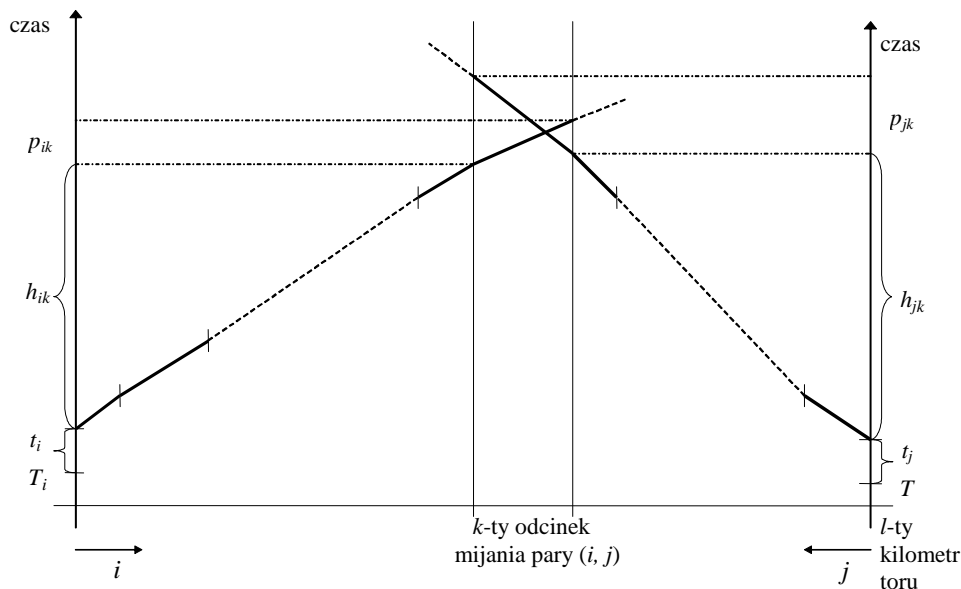
$$p_{jk} = \frac{l_k}{v_{jk}^{\max}} \quad (4)$$

n, m – liczby statków oczekujących na przejście toru, $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$

$f_{k_1}^m$ – funkcja określająca czas dojścia do bliższej krawędzi k -tego odcinka mijania,

$f_{k_2}^m$ – funkcja określająca czas dojścia do dalszej krawędzi k -tego odcinka mijania,

Interpretację graficzną warunku bezpiecznego mijania się pary statków (i, j) na dopuszczającym mijanie się odcinku k przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Mijanie się pary statków (i, j) na k -tym odcinku mijania

3. MODEL OPTYMALIZACYJNY RUCHU STATKÓW, PRZY UZMIENNIENIU CZASU OCZEKIWANIA STATKÓW NA WEJŚCIE NA TOR

Mijanie się statków jest dozwolone na wybranych odcinkach toru. Przyjmuje się, że warunki dopuszczalności mijania (ustalane przez właściwe władze, nadzorujące ruch na akwenie) zależą od parametrów odcinka i parametrów obu mijających się statków (długości, szerokości, zanurzenia) [1, 3, 5].

Można wobec tego zapisać:

$$W_{ijk}^m = W_k^t \times P_i^s(L, B, Z) \times P_j^s(L, B, Z) \quad (5)$$

gdzie:

- W_{ijk}^m – warunki mijania się pary statków (i, j) na odcinku k -tym,
- W_k^t – warunki toru na odcinku k -tym,
- P_i^s, P_j^s – parametry statków odpowiednio i -tego oraz j -tego;
- L, B, Z – odpowiednio: długość, szerokość, zanurzenie.

Przyjmując jako kryterium optymalizacji minimalizację łącznego czasu oczekiwania wszystkich statków, ograniczenia wynikające z mijania się statków można przedstawić następująco:

$$t_i - t_j \leq f_{k_2}^m(v_i, v_j, k, T_i, T_j) \quad (6)$$

$$t_i - t_j \geq f_{k_1}^m(v_i, v_j, k, T_i, T_j) \quad (7)$$

gdzie:

$$f_{k_2}^m(v_i, v_j, k, T_i, T_j) = T_j - T_i + h_{jk} - h_{ik} + p_{jk} \quad (8)$$

$$f_{k_1}^m(v_i, v_j, k, T_i, T_j) = T_j - T_i + h_{jk} - h_{ik} - p_{ik} \quad (9)$$

dla każdej pary (i, j) : $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$; dla każdego odcinka $k \in K_{ij}^m$, gdzie: K_{ij}^m – zbiór odcinków, na których dozwolone jest mijanie się pary statków (i, j) .

Zapis ograniczeń dopuszczających mijanie się wszystkich par statków na wszystkich dozwolonych dla każdej pary odcinkach toru ma charakter dychotomiczny, w związku z tym aby zastosować narzędzia pozwalające uzyskiwać rozwiązania optymalne, należy wcześniej usunąć dychotomie. Sposób w jaki można to osiągnąć przy pomocy sztucznych zmiennych binarnych, przedstawiono w [2, 3, 4].

Dla przyjętych ograniczeń modelu, sformułowano funkcję celu, jako minimalizację łącznego czasu oczekiwania wszystkich statków na wejście na tor:

$$FC = \min \left(\sum_{i=1}^n c_i t_i + \sum_{j=1}^m c_j t_j \right) \quad (10)$$

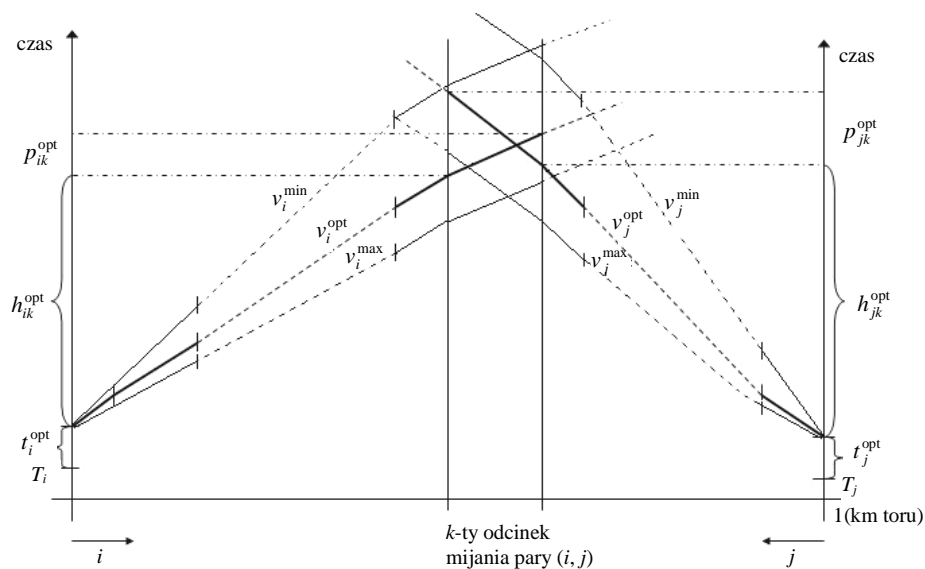
gdzie: c_i , c_j - współczynniki wagowe, pozwalające różnicować rangę statków oczekujących na przejście toru.

4. MODEL OPTYMALIZACYJNY RUCHU STATKÓW, PRZY UZMIENNIENIU CZASU OCZEKIWANIA STATKÓW NA WEJŚCIE NA TOR ORAZ PRĘDKOŚCI RUCHU NA TORZE

Zgodnie z Przepisami Portowymi, regulującymi zasady ruchu statków na torze, zależnie od odcinka toru oraz parametrów statku, prędkość i -tego statku na odcinku p -tym podlega ograniczeniom:

$$v_{ip}^{\min} \leq v_{ip} \leq v_{ip}^{\max} \quad (11)$$

Ograniczenie odgórne wynika z warunków hydrotechnicznych toru, prędkość minimalna ogranicza ruch statku przed utratą własności manewrowej statku. Interpretację graficzną mijania się statków, dla których dopuszcza się zmianę prędkości na torze w zakresie zgodnym ze wzorem (11) przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Mijanie się statków na torze przy dopuszczalnych zmianach prędkości na różnych odcinkach toru

Wprowadzając dodatkowe oznaczenia:

τ_{ip}, τ_{jp} – czas przejścia przez statki i, j p -tego odcinka toru,

oraz uzmienniając dodatkowo v_{ip}, v_{jp} , ograniczenia mijania się statków można zapisać w następującej postaci [2]:

$$T_i + t_i + \sum_{k=1}^{p-1} \tau_{ik}^m \leq T_j + t_j + \sum_{k=p}^r \tau_{jk}^m \quad (12)$$

$$T_i + t_i + \sum_{k=1}^p \tau_{ik}^m \geq T_j + t_j + \sum_{k=p+1}^r \tau_{jk}^m \quad (13)$$

Po uwzględnieniu dodatkowych zmiennych, funkcja celu przyjmie postać:

$$FC = \min \left(\sum_{i=1}^n c_i \left(t_i + \sum_{k=1}^r \tau_{ik} \right) + \sum_{j=1}^m c_j \left(t_j + \sum_{k=1}^r \tau_{jk} \right) \right) \quad (14)$$

Funkcja celu oprócz minimalizacji czasów oczekiwania statków na wejście na tor, minimalizuje czasy przejścia statków kolejnych odcinków toru (maksymalizuje prędkości statków na odcinkach toru).

5. WYKORZYSTANIE PRZEDSTAWIONYCH MODELI, WNIOSKI

Celem, który można osiągnąć wykorzystując przedstawione modele, jest wyznaczenie optymalnego harmonogramu przejścia statków oczekujących na przejście toru wodnego. Model uproszczony (przedstawiony w punkcie 3) został zbudowany w oparciu o upraszczające założenie, że ruch statków na torze odbywa się z maksymalnymi (dopuszczalnymi dla danego statku i danego odcinka toru) prędkościami. Model przedstawiony w punkcie 4 umożliwia sterowanie prędkością statku w zakresie wynikającym ze wzoru (11). Powoduje to jednak wzrost wymiaru zadania, a co za tym idzie, znaczący wzrost trudności uzyskania rozwiązania optymalnego (wzrost czasu uzyskiwania rozwiązania).

Wymiar zadania

Zmienne całkowitoliczbowe w zadaniu PCLM (zadaniu programowania matematycznego całkowitoliczbowego liniowego mieszanego) powodują, że wraz ze wzrostem wymiaru zadania, istotnie rośnie trudność jego rozwiązania.

Jeżeli:

n, m – liczby statków oczekujących dla obu kierunków,

K_{ij}^m – liczba odcinków mijania pary (i, j) ,

K_{ij}^w – liczba odcinków wyprzedzania pary (i, j) ,

to:

$n + m$ – liczba zmiennych rzeczywistych,

$2 \sum_{(ij)=1}^{n*m} K_{(ij)}^m$ – liczba ograniczeń na mijanie się statków oczekujących,

Przyjmując przykładowo:

$n = 3, m = 3, K_{ij}^m = 5$ dla każdej pary (i, j) ,

to:

liczba zmiennych rzeczywistych = 6, liczba ograniczeń pochodzących z warunków zadania = 90. Dodatkowo wystąpi 45 zmiennych binarnych (sztucznych), oraz 9 ograniczeń na zmienne binarne.

W stosunku do oszacowań zadania (model uproszczony) postaci (6) ÷ (10), wymiar zadania (model rozszerzony) postaci (11) ÷ (14) różnie o dodatkowe zmienne rzeczywiste v_{ip} , v_{jp} oraz o dodatkowe ograniczenia dotyczące prędkości:

$$v_{ip}^{\min} \leq v_{ip} \leq v_{ip}^{\max} \quad (15)$$

$$v_{jp}^{\min} \leq v_{jp} \leq v_{jp}^{\max} \quad (16)$$

oraz o podstawienia:

$$\tau_{ip} = l_p v_{ip}^{-1} \quad (17)$$

$$\tau_{jp} = l_p v_{jp}^{-1} \quad (18)$$

Jeżeli:

K^v – liczba odcinków toru o stałych warunkach ze względu na ograniczenia prędkości,

to liczba zmiennych rzeczywistych wzrośnie dodatkowo o:

$n * m * K^v$ – dodatkowa liczba zmiennych rzeczywistych,

$2 * n * m * K^v$ – dodatkowa liczba ograniczeń.

Przyjmując przykładowo jak poprzednio:

$n = 3$, $m = 3$, $K_{ij}^m = 5$ dla każdej pary (i, j) , $K^v = 13$ (dane rzeczywiste dla toru wodnego Szczecin – Świnoujście), to:

łącznie liczba zmiennych rzeczywistych = 123, liczba ograniczeń pochodzących z warunków zadania = 324. Dodatkowo wystąpi 45 zmiennych binarnych (sztucznych), oraz 9 ograniczeń na zmienne binarne.

Zadania optymalizacyjne postaci liniowej ale ze zmiennymi całkowitoliczbowymi należą do klasy NP - trudnych. Zastosowanie modelu rozszerzonego powoduje istotny wzrost wymiaru zadania, a co za tym idzie - czasu uzyskiwania rozwiązania. W warunkach rzeczywistych, na stanowisku operatora systemu VTS, zysk w postaci lepszej wartości funkcji celu okupiony istotnie dłuższym czasem uzyskiwania rozwiązania może być mało

istotny. Wykorzystanie modelu złożonego może mieć jednak inny praktyczny aspekt. W praktyce rzadko występuje problem ustalania harmonogramu wielu oczekujących statków. Często natomiast istnieje potrzeba obliczenia minimalnego czasu oczekiwania pojedynczego statku tak, by jego ruch był niekolizyjny (mijanie się z innymi statkami będącymi w tym czasie w ruchu na torze, odbywało się na dozwolonych do tego odcinkach toru) względem innych statków. W taki przypadku wykorzystanie modelu rozszerzonego pozwoli szybko uzyskać rozwiązanie optymalne, wykorzystując jednocześnie sterowanie prędkością statku na torze.

6 . BIBLIOGRAFIA

- [1] *Przepisy Portowe*, Instrukcja N° 10 Dyrektora Szczecińskiego Urzędu Morskiego, Szczecin, 1993.
- [2] Uchacz W.: *Metody modelowania i optymalizacji w symulacji i sterowaniu wybranych systemów transportu wodnego*. Seria Studia nr 46, Szczecin 2006, Wydawnictwo AM w Szczecinie
- [3] Uchacz W.: *Optimization Models in a Vessel Traffic Management Systems*, Archive of Transport, Polish Academy of Sciences, Warszawa 2003.
- [4] Uchacz W.: *Speed as Vessel Traffic Optimization Criterion*, Annual of Navigations, Polish Academy of Sciences, Gdynia 2003.
- [5] Uchacz W., Kwiatek T.: *Metoda budowy bazy wiedzy na użytek systemu VTS na torze wodnym Świnoujście – Szczecin z zastosowaniem programu Nexpert Object*, Zeszyty Naukowe WSM w Szczecinie, Szczecin 1998.