

## TRAJEKTORIA RUCHU STATKU W PROCESIE BEZPIECZNEGO PROWADZENIA STATKU PO AKWENIE OTWARTYM

### Streszczenie

Jednym z podstawowych zadań nawigacji jest zapewnienie bezpiecznej żeglugi poprzez unikanie niebezpieczeństw w trakcie realizacji podróży morskiej. Dotyczy to m.in. zaplanowania i wykonania manewru antykolizyjnego: wyznaczenia bezpiecznej trajektorii ruchu statku oraz sterowania po niej. Stąd, przy planowaniu trajektorii ruchu należy uwzględnić aktualną sytuację nawigacyjną, kryteria bezpieczeństwa, charakterystyki manewrowe statku oraz panujące warunki hydrologiczno-meteorologiczne. Ze względu na dynamikę procesów ruchu, zmieniające się warunki oraz ograniczenia czasowe dla wypracowania decyzji i jej realizacji, jest to zadanie złożone. W artykule zdefiniowano wymienione zadanie oraz przedstawiono model procesu wyznaczania trajektorii ruchu statku w sytuacji kolizyjnej z uwzględnieniem modelu środowiska. Opracowany na tej podstawie system może stanowić jeden z modułów rozwijanych obecnie nawigacyjnych systemów wspomaganie decyzji na statku morskim.

### WSTĘP

Planowanie podróży i unikanie niebezpieczeństw w czasie jej trwania należą do podstawowych zadań nawigacji służących zapewnieniu bezpiecznej podróży morskiej statku. Oba sformułować można w postaci zadania optymalizacyjnego poprzez ustalenie kryteriów, sformułowanie funkcji celu oraz ograniczeń. Pierwsze z wymienionych zadań dotyczy wyznaczenia drogi statku z punktu wyjścia, np. z portu, do punktu przeznaczenia. Drugie z nich polega na sterowaniu ruchem statku zgodnie z przyjętym planem podróży, obowiązującymi przepisami o zapobieganiu zderzeniom na morzu MPZZM, unikaniu niebezpieczeństw i rozwiązywaniu sytuacji nawigacyjnych, stanowiących zagrożenie dla bezpieczeństwa żeglugi. W obu przypadkach uwzględnia się m.in. zalecane trasy żeglugowe, przeszkody stałe, np. ograniczenia głębokości i inne niebezpieczeństwa. Przy planowaniu trasy, w tym szczególnie trasy oceanicznej, duże znaczenie mają warunki hydrologiczno-meteorologiczne. Odgrywają one również istotną rolę w procesie planowania i realizacji manewrów antykolizyjnych. Wyznaczenie bezpiecznej trajektorii ruchu statku w sytuacji kolizyjnej jest zadaniem złożonym, koniecznym do wykonania w określonym, ograniczonym, czasie. Jednocześnie rozwój technologii IT i ICT stwarza coraz szersze możliwości wspomaganie decyzji nawigatora poprzez rozszerzanie funkcjonalności użytkowanych na statkach urządzeń i systemów nawigacyjnych. Systemy te ewoluują stopniowo w kierunku systemów wspomaganie decyzji, które obok typowych funkcji informacyjnych generują rozwiązania zaistniałych sytuacjach, ułatwiając nawigatorowi podejmowanie decyzji. Proponowane rozwiązania muszą uwzględniać przyjęte kryteria bezpieczeństwa oraz, jeśli zdefiniowano, kryteria ekonomiczne. Jednocześnie rozwiązania te muszą być możliwe do wykonania. Oznacza to konieczność uwzględnienia zarówno charakterystyk manewrowych statku jak i aktualnych warunków hydrologiczno-meteorologicznych.

### 1. PROCESY STEROWANIA RUCHEM STATKU

Statek morski można rozpatrywać jako wielowarstwowy obiekt sterowania [9,12]. Wynika to z jego złożoności oraz różnego horyzontu czasowego zadań realizowanych przez poszczególne podsystemy statkowe. Można wyróżnić trzy podstawowe warstwy sterowania:

1. sterowanie ruchem statku jako planowanie trasy rejsu w celu realizacji określonego zadania transportowego, np. pogodowe planowanie podróży,
2. sterowanie ruchem statku z uwzględnieniem kontroli stanu bezpieczeństwa procesu, w trakcie realizacji zadania transportowego, np. wyznaczenie korekty wartości kursu i prędkości w stosunku do wartości zadanych, wyznaczonych w warstwie 1 w wyniku pojawienia się innych obiektów,
3. sterowanie ruchem statku jako sterowanie systemem, które reprezentują układy stabilizacji prędkości obrotowej śruby napędowej, układy regulacji silnika głównego i maszyny sterowej.

Celem nadrzędnym realizowanych procesów sterowania w każdej z warstw jest zapewnienie bezpiecznej żeglugi. Ważna dla zapewnienia konkurencyjności transportu morskiego jest także efektywność ekonomiczna. Najczęściej oznacza to dążenie do minimalizacji czasów podróży i czasów obsługi w portach (statki w żegludze trampowej), utrzymanie rozkładu rejsów (żegluga liniowa) a w przypadku żeglugi trampowej czasu podstawienia i utrzymania prędkości czarterowej. Wymienione kryteria ekonomiczne odnoszą się głównie do warstw pierwszej i drugiej. Coraz więcej uwagi poświęca się warstwie trzeciej w celu maksymalnego wykorzystania zużywanej energii i redukcji emisji zanieczyszczeń w procesie realizacji zadań pierwszej i drugiej warstwy sterowania. Każde z wymienionych zadań wiąże się z dokonywaniem wyborów i może zostać sformułowane w postaci zadania optymalizacyjnego.

### 2. SPOTKANIA STATKÓW NA AKWENIE OTWARTYM

#### 2.1. Problem wyboru drogi

Zadaniem drugiej z warstw sterowania jest zapewnienie bezpieczeństwa nawigacyjnego w ruchu statków, np. w sytuacjach kolizyjnych, przy uwzględnieniu wybranych kryteriów efektywności. Przyczyną zmiany trajektorii ruchu mogą być zakłócenia w czasie realizacji podróży. W przypadku żeglugi po akwenu otwartym są to głównie spotkania z innymi jednostkami pływającymi. Na zmianę zaplanowanej trajektorii ruchu statku mogą mieć także wpływ informacje o realizowanych i planowanych manewrach innych statków.

Użytkowane obecnie na statkach urządzenia i systemy nawigacyjne realizują głównie funkcje informacyjne i w tym zakresie wspomagają nawigatora w podejmowaniu decyzji o zachowaniu bądź zmianie trajektorii ruchu statku. Do wspomaganie decyzji w

sytuacjach kolizyjnych używane są (automatyczne) radary ze śledzeniem echa (np. Automatic Radar Plotting Aid ARPA). Stosowanymi w systemie podstawowymi kryteriami bezpieczeństwa nawigacyjnego są odległość największego zbliżenia (Closest Point of Approach CPA) i czas do osiągnięcia tej odległości (Time to Closest Point of Approach TCPA). Jedną funkcji systemu jest generowanie alarm kolizyjny w przypadku przekroczenia zadeklarowanych przez nawigatora wartości minimalnych wymienionych parametrów CPA i TCPA. System umożliwia także realizację manewru próbnego, co pozwala nawigatorowi sprawdzić, czy planowany przez niego manewr zmiany kursu pozwoli minąć się ze wskazanym obiektem w odległości nie mniejszej niż zadana (CPA). Ważnym źródłem informacji dla nawigatora jest również system zobrazowania map elektronicznych i informacji nawigacyjnych ECDIS (Electronic Chart Display and Information System), który umożliwia zobrazowanie wybranych informacji z wewnątrzsystemowej elektronicznej mapy nawigacyjnej ENC wraz z informacjami o statku własnym i innych obiektach (pozycja, kurs, prędkość i inne).

Jako kryterium bezpieczeństwa, w celu identyfikacji sytuacji niebezpiecznych i wyznaczania bezpiecznej trajektorii ruchu statku, coraz częściej proponowana jest domena statku. Jest ona definiowana jako obszar wokół statku, który nawigator powinien zachować wolnym od innych obiektów. Proponowane są różne kształty domeny. W przypadku domeny dwuwymiarowej są to najczęściej wielokąty i elipsa.

Nowoczesne technologie IT i ICT stwarzają możliwości poszerzenia zakresu wspomaganie decyzji nawigatora w procesie bezpiecznego prowadzenia statku. Wyrazem tego są publikowane wyniki prac nad systemami wyznaczania optymalnej trajektorii ruchu statku.

## 2.2. Metody wyznaczania optymalnej trajektorii ruchu statku

Prezentowane w literaturze propozycje optymalizacji trajektorii ruchu statku charakteryzują się dużą różnorodnością. Wynika ona z założeń przyjmowanych przez autorów a dotyczących metod i kryteriów stosowanych w procesie wyznaczania rozwiązań, jak i definiowanych funkcji celu (wskaźników jakości) oraz uwzględnionych ograniczeń.

W artykule [1] wyznaczono miarę ryzyka kolizji przy wykorzystaniu pojęcia domeny statku. Metodą bisekcji znajduje się największy promień domeny (domena w kształcie koła), a ryzyko kolizji oblicza się z uwzględnieniem współczynnika będącego ilorazem odległości między statkiem własnym i obcym oraz promienia domeny statku własnego, jego minimalnej wartości dla określonej sytuacji oraz czasu potrzebnego do zaplanowania wykonania manewru. Na tej podstawie wyznaczane jest rozwiązanie dla sytuacji mijania dwóch statków przy różnych wariantach manewrów, z zachowaniem obowiązujących przepisów MPZZM.

W artykule [2] zaprezentowano metodę wyznaczania bezpiecznych trajektorii statku własnego dla dowolnego kształtu domeny. Algorytm minimalizuje liczbę koniecznych manewrów statku własnego. W zależności od narzuconych parametrów dozwolone są zmiana prędkości lub kursu z uwzględnieniem wyznaczonego ryzyka na podstawie wzoru zamieszczonego w [1]. Zaletą algorytmu jest fakt, że przy dużej stracie drogi, algorytm dzieli całą grupę statków na dwie podgrupy: 1) statki o wysokim ryzyku kolizyjnym – te sytuacje są rozpatrywane jako pierwsze oraz 2) statki, dla których w danej chwili ryzyko kolizji ma niską wartość.

Innym podejściem do rozwiązywania sytuacji kolizyjnych na morzu są algorytmy ewolucyjne [3,4]. Korzysta się z nich, gdy optymalizowana funkcja jest zmienna w czasie (statek jest obiektem dynamicznym) i złożona obliczeniowo, a krótki czas obliczeń umożliwia znalezienie rozwiązania sytuacji kolizyjnej w czasie rzeczywistym

(on line). W artykule [5] do wygenerowania rozwiązania inicjuje się populację złożoną ze zbioru oryginalnych trajektorii statków, zbioru trajektorii bezpiecznych uzyskanych innymi metodami (np. metodą siatek dla obszarów ograniczonych opisaną w [6]) oraz losowych modyfikacji obu tych. Podobnie w [7]. Rezultatem proponowanej w [5] metody są trajektorie z maksimum trzema zmianami kursu – gwarantowane przez zaproponowane przez autora operatory specjalne. W artykule [7] autor prezentuje rozwiązania wyznaczone po 30 i 50 generacjach. W drugim przypadku otrzymuje rozwiązanie z mniejszą stratą drogi. Metoda proponowana przez autora jest szybko zbieżna, dlatego może być wykorzystywana w czasie rzeczywistym.

W artykule [8] autor rozważa zgodność rozwiązań z prawidłem 19 MPZZM dla ograniczonej widoczności oraz ze zmodyfikowanym diagramem zalecanych manewrów Cockrofta. Modyfikacje w prowadzone przez autora dotyczą sektorów B i C. Algorytm ewolucyjny optymalizuje średnią stratę czasu lub stratę drogi dla wszystkich statków biorących udział w spotkaniu. Analizowane są sektory diagramu, w których znajduje się statek własny oraz statek obcy, oraz narzucone bezpieczna odległość mijania oraz zalecany manewr – przejście za rufą, lub w przypadku dużej straty drogi – przejście przed rufą w dużej odległości.

Uwzględniając fakt, że w sytuacji na morzu każdy nawigator stosuje swoje metody sterowania oraz że statek jest obiektem dynamicznym można zastosować teorię gier. W pracy [9] zaproponowano zastosowanie gier dynamicznych. Przedstawiono tam, oprócz dokładnego opisu dynamiki statku, modele gry dynamicznej procesu bezpiecznego sterowania statkiem. W artykule [10] zostały wykorzystane m.in. gra pozycyjna i gra macierzowa (w wersji uproszczonej) jako modele procesu sterowania. Opracowany program wspomaga wyznaczenie optymalnej trajektorii w sytuacji mijania innych statków, uwzględnia reguły MPDM, czas wyprzedzania manewru, a także własności dynamiczne statku. Sterowanie optymalne statku własnego wyznaczane jest ze zbioru dopuszczalnych strategii własnych oraz strategii statku napotkanego. W zależności od wyboru modelu procesu sterowania i metody syntezy sterowania ustalane jest kryterium wyboru optymalnej strategii dla statku własnego. Metoda może być wykorzystana do wspomaganie decyzji nawigatora, jednak otrzymany rezultat przedstawiony dla 20 statków nie musi być do końca czytelny dla mniej doświadczonego nawigatora.

Ważnym aspektem wyznaczania trajektorii jest znajomość dopuszczalnego obszaru, po którym może płynąć statek. W artykule [11] przedstawiono sposób reprezentacji danych o akwenu, m.in. głębokości, za pomocą siatek trapezowych. Nakładanie na siebie wyznaczonych siatek prezentujących różne dane o akwenu umożliwia dokładne wyznaczenie obszaru dopuszczalnego.

Rozwiązania prezentowane w analizowanych publikacjach są interesujące, nie uwzględniają jednak zakłóceń i ograniczeń wynikających z warunków hydrologiczno-meteorologicznych. Oddziaływanie wiatru, fali czy prądu może uniemożliwić sterowanie po tak wyznaczonej trajektorii. Przy planowaniu trajektorii ruchu statku oraz w procesie sterowania statkiem, w szczególności w przypadku występowania zakłóceń, ważne jest uwzględnienie w modelu dynamiki statku wymienionych czynników zakłócających.

Odrębnym, niemniej interesującym, zagadnieniem jest pozyskanie i uwzględnienie/wykorzystanie informacji o zamierzeniach nawigatorów kierujących poszczególnymi statkami, przy wyznaczaniu bezpiecznej trajektorii statku własnego.

### 3. MODELOWANIE PROCESÓW RUCHU

#### 3.1. Model dynamiki statku

Statek jest obiektem dynamicznym, dlatego przy wyznaczaniu trajektorii należy uwzględnić równania ruchu takiego obiektu. Istnieją różne modele dynamiki ruchu statku. Wszystkie wywodzą się z II zasady dynamiki Newtona i zależą od bezwładności, przyspieszeń liniowych i kątowych oraz od superpozycji sił i momentów. Im więcej czynników, tym wektor superpozycji jest większy. Można uwzględnić siły i momenty hydrodynamiczne, hydrostatyczne, pochodzące od wiatru i fal, a także pochodzące od urządzeń sterowych i napędów.

Statek jako bryła sztywna o 6 stopniach swobody jest obiektem złożonym. Dlatego wprowadza się uproszczony model ruchu statku o 3 stopniach swobody. Model jest prostszy w obliczeniach, co ma szczególne znaczenie w przypadku zastosowań w systemach czasu rzeczywistego. Jednym z takich modeli jest model Nomoto.

Jest to podstawowy model stabilizacji kursu statku oraz sterowania po trajektorii  $\psi = \psi(\delta)$  za pomocą wychyleń steru bez uwzględniania zmian prędkości. Równania ruchu statku sprowadzają się do równań [3]:

$$\begin{aligned} X_i &= m(\dot{u} - vr - x_G r^2 - y_G \dot{r}) \\ Y_i &= m(\dot{v} - ur - y_G r^2 + x_G \dot{r}) \\ N_i &= I_z \dot{r} + m(x_G(\dot{v} + ur) - y_G(\dot{u} + vr)) \end{aligned} \quad (1)$$

Równania kinematyki w postaci macierzowej:

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_G \\ 0 & mx_G & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(v + rx_G) \\ 0 & 0 & mu \\ 0 & 0 & mx_G u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie

$m$  - masa statku,

$x_G, y_G$  - współrzędne położenia środka ciężkości kadłuba względem środka geometrycznego kadłuba,

$I_z$  - moment bezwładności wokół osi z

$X_i, Y_i, N_i$  - siły działające na kadłub w odpowiednich osiach oraz momenty wymuszające ( $i = 1$  - hydrodynamiczne,  $i = 2$  - hydrostatyczne,  $i = 3$  - od wiatru,  $i = 4$  - od fal,  $i = 5$  - od prądów morskich...)

$X, Y, N$  - sumy sił i suma momentów

Ponieważ można przyjąć prędkość wzdłużna  $u = \text{const}$ , a poprzeczną bliska 0 równanie (2) sprowadza się do postaci:

$$\begin{bmatrix} m & mx_G \\ mx_G & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & mu \\ 0 & mx_G u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \\ N \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} Y &= Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_v r + Y_\delta \delta_R, \\ N &= N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_v r + N_\delta \delta_R \end{aligned} \quad (4)$$

oraz wychylenie steru  $\delta_R$ , ma być takie żeby wartość prędkości kątowej  $r$  była dodatnia.

Jeśli przyjąć, że prędkość poprzeczna jest bliska zero ( $v=0$ ), można wyprowadzić zależność między prędkością kątową  $r$ , a wychyleniem steru  $\delta_R$  (model NOMOTO II rzędu):

$$\frac{r(s)}{\delta_R(s)} = \frac{K(1+T_3 s)}{(1+T_1 s)(1+T_2 s)}, \quad (5)$$

Parametry  $T_1, T_2, T_3, K$  - zależą od współczynników hydrodynamicznych i zachodzi zależność  $T_1 > T_2 > T_3$

Jeśli przyjmiemy, że  $\varphi = \theta = 0$  to  $r = \dot{\psi}$  i zależność między  $\psi$  a  $\delta_R$  przedstawia się równaniem różniczkowym:

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \psi = K(\delta_R + T_3 \dot{\delta}_R) \quad (6)$$

Dla dużych statków różnice między  $T_2$  i  $T_3$  są małe, więc można zapisać czas  $T = T_1 + T_2 - T_3$  i zależność między  $r$  oraz  $\delta_R$  jako model NOMOTO I rzędu:

$$\frac{r(s)}{\delta_R(s)} = \frac{K}{(1 + Ts)} \quad (7)$$

#### 3.2. Warunki zewnętrzne

Dla uwzględnienia rzeczywistych warunków żeglugi model dynamiki ruchu statku, powinien zostać uzupełniony zakłóceniami, powodującymi krótkotrwałe zmiany kursu [14]. Siły zakłócające pochodzące od środowiska morskiego zależą od:

1. wiatru (siły wiatru  $V_A$  oraz jego prędkości  $\gamma_A$ )
2. prądów morskich
3. falowania ( $H_s$  - wysokości fali,  $T$  - okresu charakterystycznego fali,  $\mu$  - kierunku geograficznego fali)

oraz ich widm.

Siły te powodują kołysanie kadłuba statku opisane układem:

$$\begin{aligned} &([M_{(k,i)}] + m_{(k,D)}(\epsilon)) \{s_{(k)}^{(2)}\} + ([B_{V(k,i)}] + [D_{(k,i)}^{(2)}]) \{s_{(k)}^{(2)}(\epsilon)\} = \{F_{(k)}^{(2)}(\epsilon)\} \\ &k, l = 1, 2, 6 \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

$[M_{(k,i)}]$  - macierz uogólnionych mas statku,

$[m_{(k,i)}(\mu_i)]$  - macierz uogólnionych mas hydrodynamicznych statku geologicznego dla wolnozmiennych kołysań

$[B_{V(k,i)}]$  - macierz zlinearyzowanych współczynników uogólnionych lepkościowych sił tłumienia

$[D_{(k,i)}^{(2)}]$  - macierz wolnozmiennych współczynników falowego tłumienia dryfu

$\{F_{(k)}^{(2)}(\epsilon)\}$  - wektor kolumnowy uogólnionych sprzężystych sił wymuszających drugiego rzędu (falowe siły dryfu), opisanych szczegółowo w [13].

Z układu (8) otrzymuje się przemieszczenia  $s_{s(0)}(t)$  dla prognoz krótkoterminowych, gdy parametry sił zakłócających przyjmuje się za stałe oraz wolnozmiennie przemieszczenia  $s_{(0)}^{(2)}(t)$  oraz prędkości kołysani statku w jego średnim położeniu.

### 4. PROCESY KOMUNIKACJI

#### 4.1. Wybrane aspekty komunikacji na morzu

Pod pojęciem komunikacji rozumiany jest proces przekazywania (wymiany) informacji między jej uczestnikami. Stanowi, obok obserwacji, istotne źródło informacji niezbędnych do podejmowania decyzji, w tym do planowania sterowania i sterowania różnymi obiektami

Rozpatrzono komunikację jako proces przekazywania informacji pomiędzy nadawcą a odbiorcą poprzez określony kanał i środki komunikacji, obejmujący trzy płaszczyzny [15]:

- komunikację jako transmisję (przekaz) informacji,
- komunikację jako percepcję przekazu, rozumienie przez adresata treści przekazu,

- komunikację jako wzajemne oddziaływanie (interakcja) uczestników tego procesu, np. w negocjacjach.

Powyższe płaszczyzny można odnieść do procesów automatycznej komunikacji z częściowym udziałem człowieka lub bez jego udziału. Oznacza to potrzebę uwzględnienia w procesach komunikacji zarówno kontekstu komunikacji, jak i występujących tam sprzężeń zwrotnych. Wyróżniono dwa typy procesów komunikacji [16]:

- procesy wymiany informacji – wymiana informacji, wg określonych standardów i zgodnie z przyjętymi procedurami: znajomość źródła komunikatu, jego typu i struktury umożliwia automatyczną interpretację jego treści,
- procesy negocjacji – wymagają znajomości kontekstu oraz pociągają za sobą interakcję między uczestnikami procesu komunikacji.

Automatyzacja – częściowa lub pełna wymienionych procesów umożliwia pozyskiwać dodatkowe informacje, często niezbędne, o środowisku i intencjach (zamiarach) innych obiektów. W żegludze morskiej są to uczestnicy procesów ruchu – nawigatorzy prowadzący statki lub statki w przypadku pojazdów autonomicznych.

Znaczenia zagadnienia automatyzacji procesów komunikacji w żegludze morskiej nie umniejsza to, że zalecane jest postępowanie według przepisów przy jednoczesnym ograniczeniu komunikacji do niezbędnego minimum. W praktyce odbywa się ona między kierującymi statkami lub w relacji statek – ład np. jeśli nawigator w danej sytuacji ma wątpliwości, w szczególności jeśli dotyczy to zagrożenia kolizją lub wystąpienia innego niebezpieczeństwa. O ile automatyzacja procesów komunikacji w zakresie wymiany informacji wg ustalonych standardów i procedur jest już realizowana w stosunkowo szerokim zakresie (nawigacyjne systemy informacyjne), to automatyzacja procesów negocjacyjnych wymaga jeszcze opracowania. Pozwoli ona na pozyskanie lub skrócenie czasu pozyskania dodatkowych informacji, np. o zamierzeniach, zmianie zamierzeń, korekcie kryteriów oceny sytuacji czy też uzgodnienia i skoordynowania działań w przypadku wystąpienia takiej konieczności. Może stanowić nową funkcjonalność zwiększającą w istotny sposób poziom świadomości sytuacyjnej na morzu (uczestnicy procesów ruchu)

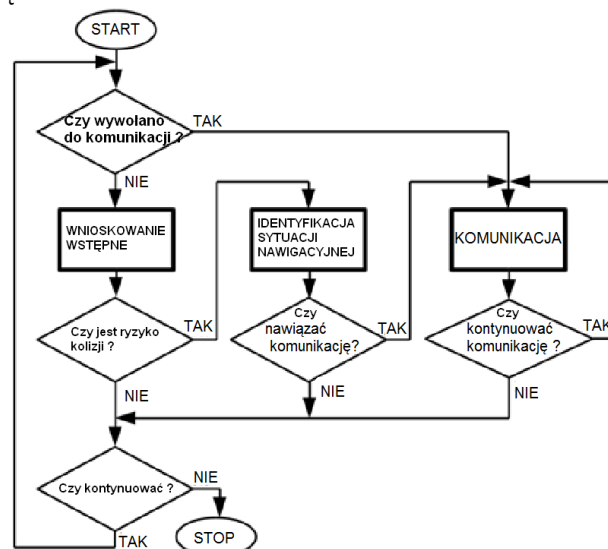
#### 4.2. Komunikacja w procesie prowadzenia statku

W artykule [17] przedstawiono zagadnienia identyfikacji sytuacji nawigacyjnej wymagającej łączności oraz zadania w zakresie komunikacji statek-statek i statek-ład. Przyjęto podział zadań stosowany w Ogólnoświatowym systemie łączności w niebezpieczeństwie i dla zapewnienia bezpieczeństwa (Global Maritime Distress and Safety System) [16], określający m.in. reguły i procedury łączności. Wskazano na fakt, że identyfikacja i ocena sytuacji oraz rozwiązanie sytuacji może wymagać pozyskania dodatkowych informacji, np. w wyniku nowych zaistniałych zdarzeń, zmiany decyzji nawigatorów, itp.. Wiąże się to z potrzebą pozyskania informacji uzupełniających w drodze dialogu, którego schemat przedstawiono na rys. 1 [18].

Zadanie jest realizowane w chwili obecnej przez nawigatorów prowadzących statki oraz personel ośrodków lądowych [16].

Realizacja tak sformułowanego zadania – automatyzacji procesów komunikacji na morzu - wymaga opracowania ontologii informacji nawigacyjnej i ontologii komunikacji, które pozwolą zidentyfikować, opisać w jednolity sposób i interpretować procesy komunikacji między nawigatorami w sposób automatyczny lub tylko z częściowym ich udziałem. Pozyskane informacje przyczynią się do wzrostu świadomości sytuacyjnej uczestników ruchu oraz poprawy

jakości podejmowanych decyzji, np. wyznaczenia bezpiecznej trajektorii ruchu statku. System automatycznej komunikacji uruchamiany jest w zadanych odstępach czasowych. Danymi wejściowymi są m.in. dane dotyczące własnej i innych jednostek (zmiany trajektorii ruchu) dane dotyczące akwenu oraz warunków meteorologicznych i stanu widoczności. Wynik działania systemu przechowywany jest do zakończenia sytuacji nawigacyjnej z rozpatrywaną jednostką.



Rys 1. Model procesów wnioskowania w systemie automatycznej komunikacji w transporcie morskim – fazy procesu [18]

## 5. BEZPIECZNA TRAJEKTORIA RUCHU STATKU

### 5.1. Model procesu decyzyjnego

Znalezienie bezpiecznej trajektorii zależy od przyjętych kryteriów wyboru drogi, np. straty drogi, czasu realizacji manewrów, liczby wykonanych manewrów, zużycia paliwa. Na proces wyznaczenia trajektorii ruchu statku wpływa wiele czynników, m.in. warunki akwenu, warunki meteorologiczne, typ i rodzaj statku, parametry innych obiektów znajdujących się w pobliżu statku własnego (rys. 2).

W modelu procesu wyznaczania bezpiecznej trajektorii (Rys. 3.) uwzględniono dynamikę środowiska zakłócenia oraz ograniczenia wynikające z oddziaływania na statek czynników zewnętrznych, takich jak wiatr, falowanie i prądy, jak też informacje o zamierzeniach nawigatorów kierujących poszczególnymi statkami, pozyskane z wykorzystaniem modułu automatycznej komunikacji między statkami (systemami statkowymi).

### 5.2. Zadanie optymalizacyjne

Problem znalezienia bezpiecznej trajektorii jest zadaniem nieliniowym, z racji dynamiki ruchu statku. Przyjęte ograniczenia mogą również wystąpić w postaci nieliniowej. Może to być na przykład równanie trajektorii statku obcego, który przekazał wiadomość o niemożliwości wykonania jakiegokolwiek manewru. W związku z tym, taką informację również należy przyjąć jako ograniczenie nieliniowe.

Obiektem optymalizacji będzie trajektoria statku w sytuacji kolizyjnej. Głównym kryterium, brany pod uwagę będzie strata drogi. Zależy ona m.in. od rodzaju statku – jego rozmiarów, typu, manewrowości, rodzaju akwenu oraz uwarunkowania linii brzegowej. Z racji tego, że trasa została już wcześniej zaplanowana, a wymaga zmiany jeśli ma dojść do sytuacji kolizyjnej, część zmiennych będzie można przyjąć jako niezależne parametry, na przykład uwarunkowania linii brzegowej.

Założono, że dostępne są dane:

1. ograniczenia statyczne akwenu, np. mielizny;
2. pozycje, kursy i prędkości statków biorących udział w spotkaniu;
3. parametry statku umożliwiające oszacowanie dynamiki, np. czas potrzebny na wykonanie manewru.
4. parametry zakłóceń (kąć i prędkość wiatru, wysokość fali, itp.).

Kryteria uwzględniane przy rozwiązaniu problemu:

1. widoczne zmiany kursu;
2. reguły COLREGS;
3. przestrzeń wolna od innych statków np. określona przez domenę;
4. statki poruszają się z bezpiecznymi prędkościami.

Zadanie sprowadza się do znalezienia takiej trajektorii i takiego sterowania z możliwych, by strata drogi była jak najmniejsza.

$$J(\hat{x}(t), \hat{u}(t), t) = \min_{x(t) \in X, u(t) \in U} \int_{t_0}^{t_k} f_0(x(t), u(t), t) dt \quad (9)$$

X – zbiór trajektorii dopuszczalnych,  $\hat{x}(t)$  – trajektoria optymalna  
 U – zbiór sterowań dopuszczalnych,  $\hat{u}(t)$  - sterowanie odpowiadające trajektorii optymalnej

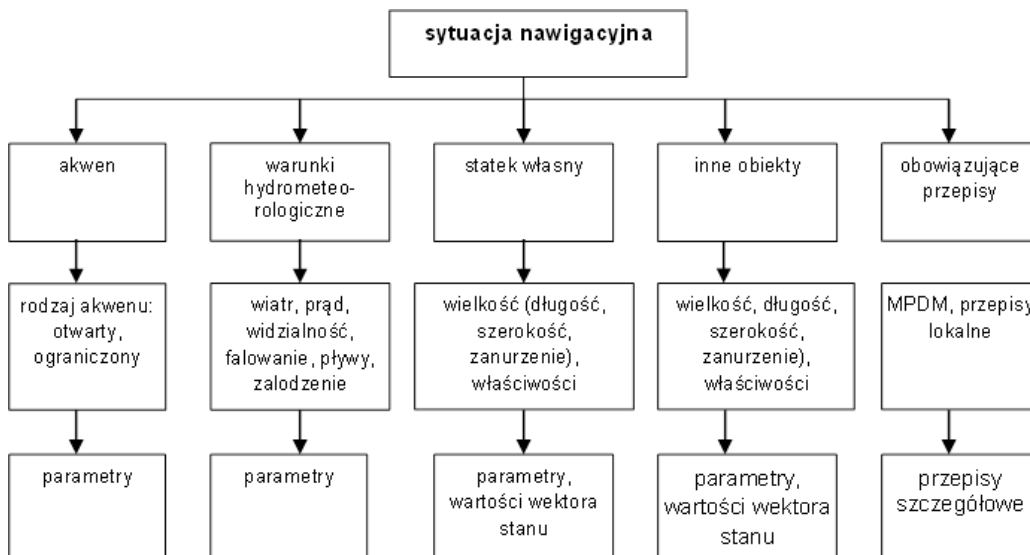
Funkcja strat  $f_0$  ma zapewniać spełnianie postawionych kryteriów. Z jednej strony spełnione będzie kryterium bezpieczeństwa, poprzez zadane CPA możliwe jest wyznaczenie bezpiecznej odległości minięcia się statków. Z drugiej funkcja ta minimalizuje straty drogi. Zapewnia zatem szybkie dotarcie do zadanego punktu celu.

## PODSUMOWANIE

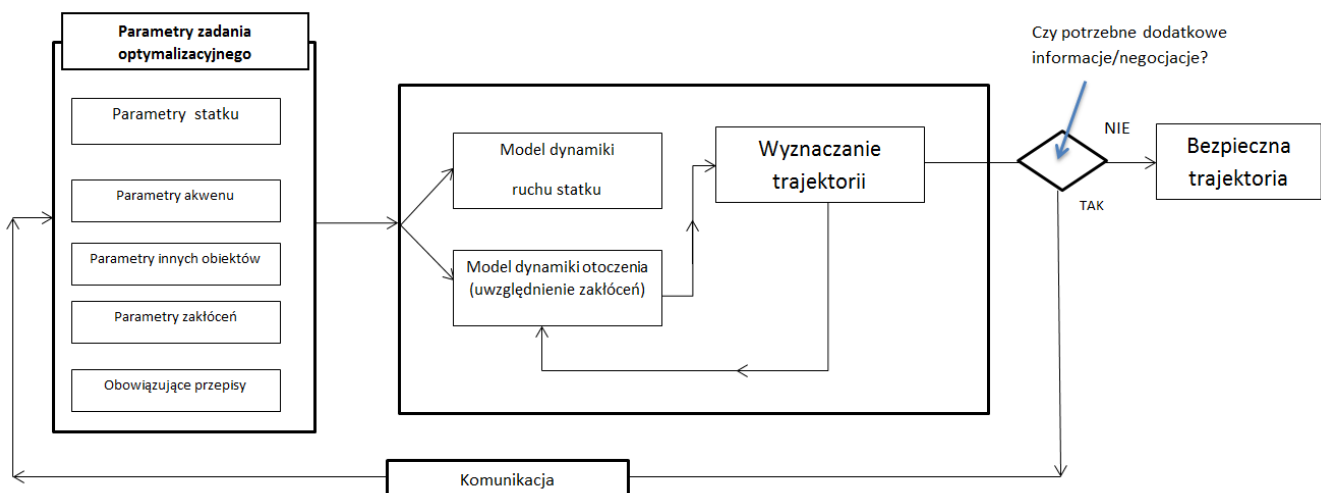
W artykule analizowano zadanie wyznaczania trajektorii ruchu statku w sytuacji kolizyjnej na akwenu otwartym.

Przedstawiono model procesu wyznaczania bezpiecznej trajektorii z uwzględnieniem dynamiki statku własnego i środowiska, w tym warunków hydrologiczno-meteorologicznych i dodatkowych informacji o zamierzeniach nawigatorów kierujących poszczególnymi statkami.

Planuje się opracowanie na tej podstawie systemu wyznaczania trajektorii ruchu statku w sytuacji kolizyjnej z uwzględnieniem modelu środowiska. Przewiduje się, że system będzie stanowić jeden z modułów rozwijanych obecnie nawigacyjnych systemów wspomagania decyzji na statku morskim



Rys. 2. Model sytuacji nawigacyjnej [12]



Rys. 3. Model procesu wyznaczania bezpiecznej trajektorii z uwzględnieniem dynamiki środowiska

## BIBLIOGRAFIA

1. Szlarczyński R., *A unified measure of collision risk derived from the concept of a ship domain*, The Journal of Navigation, 59/2006, pp 477-490
2. Szlarczyński R., *A new deterministic method of finding safe ship trajectory for any convex domain*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, Rok XLVII NR166K/1 2006, pp413-421
3. Śmierchalski R., *Automatyzacja i sterowanie statkiem*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 2013
4. Śmierchalski R., *Synteza metod i algorytmów wspomagania decyzji nawigatora w sytuacji kolizyjnej na morzu*, Gdynia 1998
5. Szlarczyński R., "Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories: A New Approach To Collision Avoidance", The Journal of Navigation, 64/2011, pp. 169-181]
6. Szlarczyński R., *A new method of ship routing on raster grids, with urn penalties and collision avoidance*, The Journal of Navigation, 59/2006, pp27-42
7. Szlarczyński R., *Evolutionary Approach to Solving multi-ship Encounter Situations*, Marine Navigation and Safety of Sea Transportation – red. Adam Weintrit, 2009, pp.437-442
8. Szlarczyński R., *Planowanie i wizualizacja bezpiecznych manewrów statków na zmodyfikowanym diagramie Cockrofta.*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, 2015
9. Lisowski J., *Statek jako obiekt sterowania automatycznego*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk, 1981
10. Lisowski J., *Metody komputerowego wspomagania decyzji manewrowej nawigatora w sytuacjach kolizyjnych*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, Rok LIV NR 1 (192) 2013, pp. 67-78
11. Mąka M., *Rekurencyjny algorytm dyskretyzacji obszaru z wykorzystaniem siatki trapezowej*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie 29(101), Szczecin, 2012, s.134-139
12. Pietrzykowski Z., *Modelowanie procesów decyzyjnych w sytuacjach spotkań statków na akwenie otwartym*, Problemy automatyki i sterowania statkiem, Wyd. AM w Gdyni, Gdynia, 2007, str. 129-136
13. Pietrzykowski Z., *Modelowanie procesów decyzyjnych w sterowaniu ruchem statków morskich*, Szczecin, 2004, seria Studia nr 43.
14. Szalangiewicz T., *Podstawy teorii projektowania kotwicznych systemów utrzymywania pozycji jednostek pływających*, Biblioteka Okrętowa, tom X, pp163-164
15. Pietrzykowski Z., Szewczuk T., Wójcik A., Banaś P., *Procesy wnioskowania w systemie automatycznej komunikacji w żegludze morskiej*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej z. XX Transport, 2013.
16. Pietrzykowski Z., Banaś P., Wolejsza P., Hatlas P., *Subontologia komunikacji w automatyzacji procesów wymiany informacji i negocjacji na morzu*. Logistyka 6/2014, str. 8654-8665
17. Banaś P., Wójcik A., Pietrzykowski Z., Wolejsza P., *Automation of processes of identifying navigation situations requiring communication to be established by a sea-going vessel*, Scientific Journals Maritime University od Szczecin, No. 36.1, 2013
18. Wójcik A., Banaś P., Pietrzykowski Z., *Schema of inference processes in a preliminary identification of navigational situation in maritime transport*, Springer, Telematics - Support for Transport, Communications in Computer and Information Science Volume 471, 2014, pp 130-136

## SHIP MOVEMENT TRAJECTORY IN SAFE SHIP NAVIGATION IN THE OPEN SEA AREA

### Abstract

*One of the basic navigational tasks is to provide safe navigation by avoiding dangerous situations during the ship voyage. This includes, inter alia, planning and execution of anti-collision manoeuvres: a safe ship trajectory determination and ship movement control. Therefore, when planning the ship trajectory, the navigator should take into account several elements: current navigational situation, safety criteria, ship's manoeuvrability and hydro-meteorological conditions. This task is complex due to the dynamics of traffic processes, changing conditions, time-limits for reaching a decision and its implementation. The authors formulate the mentioned task and present the process model for ship trajectory determination in collision situations, taking into account the ship environment model. The system developed on this basis can be incorporated as a module of navigation decision support systems for sea going ships.*

Autorzy:

**Zbigniew Pietrzykowski** – Akademia Morska w Szczecinie.

**Sylvia Mielniczuk** – Akademia Morska w Szczecinie

**Paulina Hatlas** – Akademia Morska w Szczecinie.