



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI

Imię i nazwisko autora rozprawy: Mgr inż. Bartosz Jaworski

Dyscyplina naukowa: Automatyka

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Ewolucyjny system do wyznaczania ścieżek przejść obiektów morskich w obszarach o dużym natężeniu ruchu.

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Evolutionary path planning system for maritime objects in high traffic density areas.

Promotor	Drugi promotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
Prof. dr hab. inż. Roman Śmierzchalski	
Promotor pomocniczy	Kopromotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>

Gdańsk, rok 2016

Spis treści

Wykaz najważniejszych pojęć i skrótów.....	1
1 Wstęp.....	2
1.1 Wprowadzenie.....	2
1.2 Założenia i obszar pracy.....	6
1.3 Teza i cele pracy.....	7
1.4 Struktura pracy.....	8
2 Wspomaganie decyzji nawigacyjnych w obszarze o dużym natężeniu ruchu.....	10
2.1 Obszar o dużym natężeniu ruchu – obszar objęty nadzorem systemu VTS.....	10
2.2 System wspomagania decyzji na morzu.....	13
2.3 Systemy wspomagania decyzji rozszerzające funkcjonalność systemów VTS.....	14
2.3.1 Systemy wspomagania decyzji wyznaczające ścieżki przejść wykorzystujące systemy ekspertowe.....	14
2.3.2 Systemy wspomagania decyzji wykorzystujące deterministyczne metody wyznaczania ścieżek przejść.....	19
2.3.3 Inteligentny system transportowy.....	23
2.4 Podsumowanie.....	24
3 Metody wyznaczania ścieżek przejść.....	25
3.1 Wprowadzenie.....	26
3.2 Metody wyznaczania manewru unikania kolizji.....	26
3.3 Metody wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść.....	29
3.3.1 Metody deterministyczne.....	29
3.3.2 Metody heurystyczne.....	30
3.4 Podsumowanie.....	38
4 Algorytmy ewolucyjne.....	39
4.1 Wstęp.....	39
4.2 Optymalizacja a algorytmy ewolucyjne.....	40
4.3 Schemat funkcjonowania algorytmów ewolucyjnych.....	41
4.4 Modyfikacje algorytmów ewolucyjnych.....	44
4.4.1 Inkrementacyjny algorytm ewolucyjny.....	44
4.4.2 Wielopopulacyjny algorytm ewolucyjny.....	44
4.4.3 Skalowanie funkcji przystosowania.....	46
4.4.4 Metody Selekcji.....	48
4.5 Ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść na morzu.....	50
4.6 Podsumowanie.....	52
5 Hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść.....	53

5.1 Dane wejściowe.....	55
5.2 Wyznaczanie pozycji w hierarchii dla statków w obserwowanym środowisku.....	57
5.2.1 Wprowadzenie danych wejściowych do algorytmu hEP/N.....	57
5.2.2 Identyfikacja statków zagrożonych kolizją	59
5.2.3 Wyznaczenie pozycji statków w hierarchii	61
5.2.4 Akceptacja wyznaczonej hierarchii	64
5.3 Wyznaczanie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść w algorytmie hEP/N.....	66
5.3.1 Odwzorowanie środowiska morskiego w algorytmie hEP/N.....	68
5.3.2 Poszukiwanie i ocena ścieżek przejść w algorytmie hEP/N.....	69
5.3.3 Modyfikacje algorytmów ewolucyjnych wykorzystane w algorytmie hEP/N.	74
5.3 Realizacja wyznaczonego zbioru bezpiecznych ścieżek przejść.....	76
5.4 Porównanie hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść z metodą ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii statków	77
6 Badania.....	79
6.1 Środowisko oraz metodologia badań.....	79
6.2 Sytuacja kolizyjna dwóch statków na kursie przecinającym – scenariusz testowy I	81
6.3 Kolizja trzech statków – scenariusz testowy II	84
6.4 Omijanie przeszkody statycznej przez trzy statki – scenariusz testowy III.....	87
6.5 Sytuacja kolizyjna w kanale – scenariusz testowy IV	90
6.6 Sytuacja kolizyjna podczas wyprzedzania jednostki – scenariusz testowy V	94
6.7 Wyprzedzanie wielu statków – scenariusz testowy VI	97
6.8 Przykładowe odwzorowanie rzeczywistej implementacji systemu opartego na algorytmie hEP/N – scenariusz testowy VII i VIII	99
6.9 Badanie porównawcze hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść z metodą ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii – scenariusz testowy IX.....	103
6.10 Podsumowanie badań.....	106
7 Podsumowanie.....	107
8 Bibliografia.....	110
9. Dodatki	122
9.1 Definicje	122
9.2 Wybrane przepisy COLREG	122
9.2.1 Przepis 2.....	122
9.2.2 Przepis 13.....	123
9.2.3 Przepis 15.....	123
9.2.4 Przepis 16.....	123
9.2.5 Przepis 17.....	123

9.2.6 Prawidło 18.....	124
9.3 Elektroniczne mapy nawigacyjne - ECDIS	126
9.4 System ARPA.....	130
9.5 System AIS.....	133
9.5.1 Podstawowe parametry systemu AIS	133
9.5.2 Wymagania techniczne.....	134
9.5.3 Wymagania dotyczące systemu AIS Klasy A	137
9.5.4 Informacje przysyłane przez statkowy system AIS klasy A	139
9.5.5 Analiza ruchu statków z wykorzystaniem danych transmitowanych przez AIS	143
9.5.6 Jakość informacji pozyskiwanych z systemu AIS.....	145
9.6 System LRIT	147
9.7 System VTMIS.....	148
9.8 Etapy spotkania statków w sytuacji kolizyjnej.....	150
9.9 Statki biorące udział w badaniach dla scenariuszy testowych VII i VIII	153
9.9.1 Scenariusz testowy VII.....	153
9.9.2 Scenariusz testowy VIII	154

Wykaz najważniejszych pojęć i skrótów

AIS (ang. Automatic Identification System) – system automatycznej identyfikacji statków

COLREG – międzynarodowe przepisy o zapobieganiu zdarzeniom na morzu

CPA (ang. Closest Point of Approach) – najmniejsza odległość zbliżenia do obiektu

domena bezpieczna statku – obszar wokół jednostki, którego naruszenie przez obiekty statyczne lub dynamiczne grozi kolizją lub unieruchomieniem statku własnego

DSS (ang. Decision Support System) – system wspomagania decyzji

ECDIS (ang. Electronic Chart Display and Information System) – system map elektronicznych

GIS (ang. Geographic Information System) – System Informacji Geograficznej

hEP/N (ang. hierarchical Evolutionary Planner/Navigator) – hierarchiczny Ewolucyjny Planer/Nawigator – algorytm ewolucyjny opracowany na potrzebę omawianej pracy

hierarchia – kolejność poszukiwania ścieżek w zbiorze statków w obserwowanym środowisku

IMO (ang. International Maritime Organization) – Międzynarodowa Organizacja Morska

OS (ang. Own Ship) – statek własny – statek, na którym podejmuje się akcję unikania kolizji

PPC (ang. Potential Point of Collision) – punkt potencjalnej kolizji dwóch statków

TCPA (ang. Time to Closest Point of Approach) – czas do wystąpienia najmniejszej odległości zbliżenia do obiektu

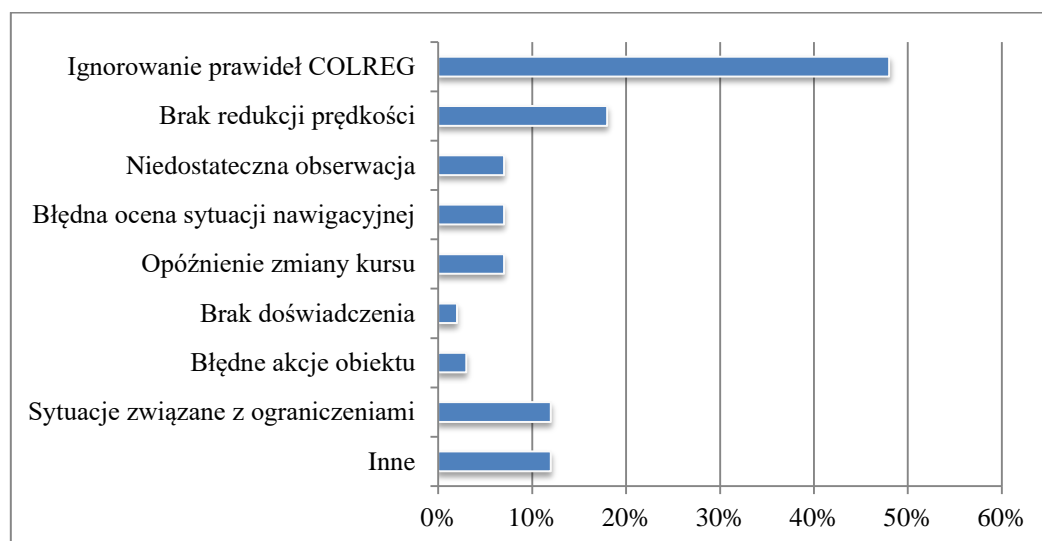
TS (ang. Target Ship) – obiekt – statek, który stwarza sytuację zagrożenia kolizyjnego dla statku własnego

VTS (ang. Vessel Tracking System) – służba kontroli ruchu morskiego

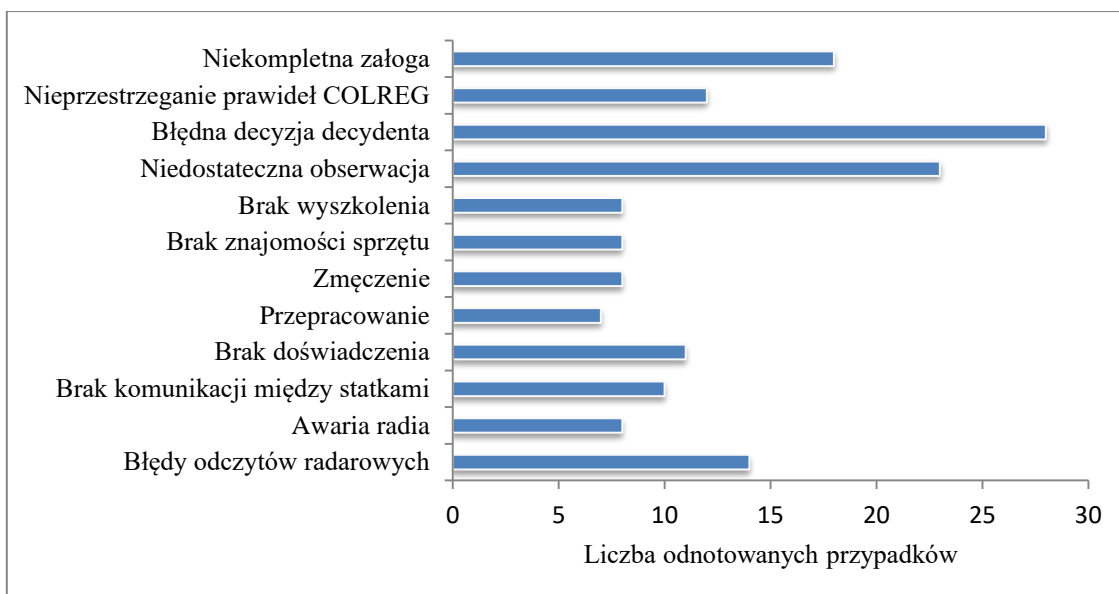
1 Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Rozwój gospodarczy świata stawia coraz większe wymagania ekonomiczne wobec żeglugi morskiej, stanowiącej znaczący element gospodarki międzynarodowej. Armatorzy dążą do zapewnienia terminowości transportu towarów do portów bez względu na warunki hydrometeorologiczne, a także redukcji kosztów eksploatacyjnych statków z jednoczesnym zachowaniem bezpieczeństwa żeglugi. Analizy prowadzone przez towarzystwa klasyfikacyjne wskazują, że 80% niebezpiecznych zdarzeń na morzu jest związanych z błędnymi decyzjami człowieka (Rothblum 2000). W większości wynikają one z nieprzestrzegania międzynarodowych przepisów o zapobieganiu zderzeniom na morzu, czyli prawideł COLREG (rysunek 1). Błędne decyzje są również skutkiem braków w wyszkoleniu, wadliwego zarządzania harmonogramem pracy i szeregu innych czynników (rysunek 2). Mimo stosowanych dziś systemów wspomaganie decyzji, wciąż dochodzi do kolizji statków, które stanowią najczęściej występujący typ wypadków na morzu (rysunek 3). Szczególne zagrożenie dotyczy obszarów o dużym natężeniu ruchu takich jak dojścia do portów, strefy przybrzeżne oraz wąskie przejścia morskie związane z ograniczeniami nawigacyjnymi (kanały, cieśniny) (Śmierzchalski 1998). W tych rejonach przestrzeni, w której mogą poruszać się statki, regulują ustanowione formalnie rejony rozgraniczenia ruchu, tak zwane tory wodne. Szlaki te są jednak używane przez statki realizujące różne zadania. Kolejnym czynnikiem wpływającym na bezpieczeństwo żeglugi jest ograniczona widzialność. W analizie przyczyn zgonów na morzu przeprowadzonej w pracy (Svetak 2003) wykazano na próbie 500 statków, że w 10% przypadków śmierć nastąpiła wskutek kolizji statków.



Rysunek 1 – Przyczyny nieprzestrzegania prawideł COLREG. Dane zebrane na potrzeby projektu SPIRIT (Ziarati 2007).

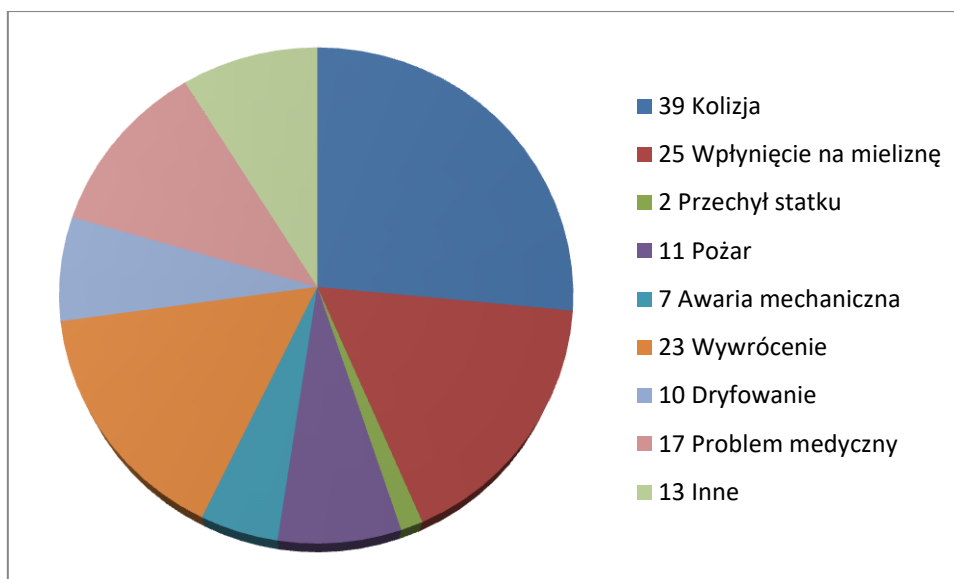


Rysunek 2 – Typowe przyczyny kolizji zestawione na podstawie analizy raportów wypadków dokonanej na potrzeby projektu SPIRIT (Ziarati 2007).

Należy podkreślić, że decydent może nie wybrać optymalnego manewru w danej sytuacji nawigacyjnej nawet w sprzyjających warunkach. Decydemtem w tym wypadku jest oficer wachtowy lub kapitan danej jednostki.

W pracy (Pietrzykowski 2004) wskazano, że podejmowane przez człowieka decyzje są psychologicznie obciążone szeregiem ryzykownych czynników:

- rozstrzygnięcia dokonywane są poprzez uproszczenie złożonego zadania, wskutek ignorowania niektórych wariantów rozwiązań i ich rezultatów,
- decydenci przeceniają możliwość wystąpienia zdarzeń mało prawdopodobnych, jednocześnie nie biorąc pod uwagę możliwości zaistnienia zdarzeń wysoce prawdopodobnych,
- w prostych, ryzykownych zadaniach decydenci wybierają algorytmiczną strategię maksymalizującą subiektywnie oczekiwany wynik podjętej decyzji, która jest liniową kombinacją indywidualnie postrzeganego prawdopodobieństwa wyników i skutków,
- poziom podejmowanego ryzyka wiąże się z potrzebą agresji i dominacji decydenta. Jest to indywidualna cecha charakteru, która pozwala mu akceptować wyższy poziom ryzyka w procesie podejmowania decyzji (Kaplński 1997).



Rysunek 3 – Wykres kołowy przedstawiający liczbę wypadków morskich w Wielkiej Brytanii i Turcji w roku 2012 uszeregowanych pod względem typu zdarzenia (Ziarati 2014). Według tych danych kolizje stanowią najczęściej występujący rodzaj wypadku morskiego.

Podsumowując, decyzje podejmowane przez decydenta związane są z ryzykiem błędu, który może doprowadzić do kolizji statków. Dlatego też korzystne jest, aby decyzje te były podejmowane w oparciu o dane prezentowane przez system wspomaganie decyzji. Takie rozwiązanie pomoże decydentowi prowadzić statek bezpiecznie oraz po możliwie najkrótszym kursie, co pozwoli zredukować liczbę kolizji.

Z tego powodu w nawigacyjnych systemach wspomaganie decyzji problem definiuje się następująco: dany jest ruchomy obiekt o określonych własnościach dynamicznych i kinematycznych oraz środowisko, w którym się on porusza. Należy znaleźć ścieżkę przejścia między punktem początkowym i końcowym, spełniającą warunki omijania przeszkód statycznych i dynamicznych oraz inne kryteria optymalizacyjne (Śmierzchalski 1998).

W niniejszej pracy problem ten został rozszerzony na zbiór jednostek morskich znajdujących się w obszarze o dużym natężeniu ruchu. Pozwala to na optymalizację potencjalnie obniżającą koszty pokonywania tych ścieżek dla wszystkich rozpatrywanych statków przy uwzględnieniu prawideł COLREG określających pierwszeństwo drogi obiektów w sytuacjach potencjalnej kolizji. Dla tak opisanych wymagań zadanie zostało zdefiniowane następująco: dane jest środowisko o ograniczonym obszarze, w którym znajdują się obiekty statyczne i dynamiczne. Należy wyznaczyć ścieżki przejść dla obiektów dynamicznych umożliwiające każdemu z tych obiektów pokonanie zakładanej trasy. Ścieżki te muszą spełniać warunki omijania przeszkód statycznych (łądy, obszary ograniczenia ruchu) i dynamicznych (inne statki) oraz uwzględniać ekonomikę żeglugi (długość trasy, zakres zmian kursu i czas przebycia ścieżki przejścia), jak również prawidła COLREG. Za środowisko przyjmuje się obszar o dużym natężeniu ruchu.

Żeby rozwiązać to zadanie, opracowano hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść. Metoda ta została wykorzystana w algorytmie hEP/N (ang. hierarchical Evolutionary Planner/Navigator – hierarchiczny Ewolucyjny Planer/Nawigator). Algorytm ten został zbudowany w oparciu o algorytm Evolutionary Planner/Navigator w wersji $\mathcal{E}EP/N++$ (Śmierzchalski 1998). Pozwala to wykorzystać zalety algorytmu $\mathcal{E}EP/N++$ w zadaniu wyznaczania ścieżek przejść dla zbioru obiektów dynamicznych w obserwowanym środowisku. Algorytm $\mathcal{E}EP/N++$ został opisany w dalszej części pracy.

Istotnym elementem hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść jest możliwość wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść z uwzględnieniem prawideł COLREG. Prawidła te opisują, który z dwóch statków w sytuacji potencjalnej kolizji posiada pierwszeństwo drogi. Oznacza to, że w danym środowisku możliwe jest określenie hierarchii statków, w której część jednostek ustępuje drogi innym statkom. Hierarchia ta, wyznaczana w algorytmie hEP/N, determinuje kolejność poszukiwania ścieżek przejść dla statków w obserwowanym środowisku. Dla pierwszej jednostki (o najwyższej pozycji w hierarchii) zostaje ona wyznaczona w środowisku, w którym występują jedynie ograniczenia statyczne. Przy poszukiwaniu ścieżki przejścia dla drugiego statku, algorytm uwzględnia konieczność uniknięcia kolizji z wcześniej rozpatrywanym obiektem. Dla kolejnej jednostki poszukuje się ścieżek niezagrażających kolizją ze statkami, dla których ścieżka przejścia została wyznaczona. Proces ten jest powtórzony dla każdej jednostki w obserwowanym środowisku. Każdy statek musi również unikać przeszkód statycznych. Algorytm hEP/N działa z uwzględnieniem prawideł COLREG przy jednoczesnej możliwości wyznaczenia bezpiecznego scenariusza zachowania statków w przypadku, gdy dowolny obiekt nie stosuje się do postanowień tych prawideł. Jest to możliwe poprzez modyfikację pozycji w hierarchii statku nieprzestrzegającego prawideł COLREG na wyższą przez operatora algorytmu hEP/N.

Dane wejściowe algorytmu można pozyskać z morskich systemów śledzenia i identyfikacji statków. Pozwalają one zidentyfikować obiekt (przy pomocy systemu AIS – ang. Automatic Identification System), śledzić jego ruch (przy wykorzystaniu systemu VTS – ang. Vessel Tracking System) oraz wyznaczać bezpieczny kurs na podstawie danych z radaru (przy użyciu systemu ARPA – ang. Automatic Radar Plotting Aid) (Abramowicz-Gerigk 2009). W opracowanej metodzie, wymagane dane wejściowe dostępne są w systemie AIS. Dane te przetwarzane będą w systemie VTS. Osoba nadzorująca dany obszar będzie otrzymywać rozwiązanie algorytmu, który pozwoli bezpiecznie koordynować ruch nadzorowanych statków.

1.2 Założenia i obszar pracy

W pracy opracowano hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść, która wyznacza zbiór bezpiecznych ścieżek przejść statków znajdujących się w obserwowanym środowisku wykorzystując metodę ewolucyjną. Proces ten będzie uwzględniać przepisy COLREG. Opisywana metoda spełnia następujące założenia:

- parametry statków znajdujących się w obserwowanym środowisku można pozyskać z systemu AIS,
- przez środowisko należy rozumieć obszary morskie objęte nadzorem systemu VTS (lub jego pochodnymi) odwzorowane w algorytmie ewolucyjnym,
- w omawianej wersji algorytmu dane wejściowe wprowadzane są przez operatora,
- w obserwowanym środowisku występują przeszkody statyczne i dynamiczne,
- przez przeszkodę dynamiczną należy rozumieć statek, który posiada pierwszeństwo drogi względem jednostki, dla której w danym momencie wyznaczana jest ścieżka przejścia,
- hierarchię statków ustala się na podstawie przepisów COLREG,
- ścieżki wyznaczane są przez algorytm ewolucyjny, którego cechy i parametry podlegają konfiguracji,
- wyznaczone ścieżki muszą spełniać parametry bezpieczeństwa i ekonomiki podróży według założonych warunków oceny,
- algorytm działa w czasie zbliżonym do rzeczywistego,
- rozwiązanie będzie przedstawiane operatorowi systemu VTS, co pozwoli na weryfikację i możliwe wdrożenie wyznaczonego rozwiązania,
- algorytm umożliwi symulację wyznaczonego rozwiązania.

Badania metody spełniającej te założenia obejmują:

- podstawowe morskie sytuacje kolizyjne, dla których zachowanie statków jest zgodne z przepisami COLREG,
- inne morskie sytuacje kolizyjne, których nie można wyznaczyć rozwiązania w oparciu o przepisy COLREG.

1.3 Teza i cele pracy

Tezę pracy formułuje się następująco:

Wykorzystanie metody ewolucyjnej do wyznaczania ścieżek przejść statków pozwoli na rozszerzenie funkcjonalności systemów nadzoru i śledzenia jednostek morskich o możliwość koordynacji ścieżek przejść dla wszystkich obiektów obecnych w nadzorowanym obszarze o dużym natężeniu ruchu i jednocześnie może to przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa.

Głównym celem pracy jest opracowanie ewolucyjnej metody do wyznaczania ścieżek przejść. Proponowana metoda pozwoli na:

- potencjalne rozszerzenie funkcjonalności obecnie stosowanych systemów nadzoru ruchu morskiego o możliwość wyznaczania zbioru bezpiecznych ścieżek przejść dla statków znajdujących się w obserwowanym środowisku,
- wyznaczanie ścieżek przejść z uwzględnieniem hierarchii. Hierarchia ta wyznaczana jest przez algorytm hEP/N w oparciu o zasady COLREG. W szczególnych wypadkach możliwa jest modyfikacja hierarchii przez operatora algorytmu.
- wyznaczanie ścieżek przejść dla statków przy użyciu metody ewolucyjnej z uwzględnieniem następujących parametrów:
 - bezpieczeństwo,
 - długość ścieżki przejścia,
 - liczba i zakres zmian kursu,
 - czas potrzebny do pokonania ścieżki przejścia;
- wyznaczenie bezpiecznych ścieżek przejść, czyli takich, które nie przecinają przeszkód statycznych oraz gwarantują bezkolizyjność z innymi statkami,
- przeprowadzenie symulacji z wykorzystaniem danych, które można pozyskać z istniejących systemów śledzenia i nadzoru jednostek morskich,
- wyznaczanie wyników w czasie zbliżonym do rzeczywistego, co pozwoli na aktualizację rozwiązania algorytmu wraz z odświeżaniem informacji w systemie AIS.

1.4 Struktura pracy

Praca składa się z siedmiu rozdziałów zorganizowanych w następujący sposób:

W rozdziale pierwszym przedstawiono motywacje do rozwiązania analizowanego problemu oraz wprowadzono ogólny opis proponowanej metody. Zdefiniowano założenia i cele, jak również sformułowano tezę pracy.

W rozdziale drugim zaprezentowano:

- definicję obszaru o dużym natężeniu ruchu,
- definicję oraz podstawowe aspekty systemu VTS,
- opis oraz wymagania systemu wspomagania decyzji w środowisku morskim,
- przegląd systemów wspomagania decyzji rozszerzających funkcjonalność systemów VTS.

W rozdziale trzecim przedstawiono przegląd metod wyznaczania ścieżek przejść w środowisku morskim. Dokonano podziału tych metod oraz przedstawiono opis wybranych prac.

W rozdziale czwartym omówiono algorytmy ewolucyjne. Opisano podstawowe informacje dotyczące metody ewolucyjnej oraz jej modyfikacji. Rozdział podzielono na następujące elementy:

- wprowadzenie do algorytmów ewolucyjnych,
- omówienie zalet oraz wad metody ewolucyjnej na tle metod klasycznych,
- omówienie schematu i etapów działania algorytmu ewolucyjnego,
- przedstawienie modyfikacji algorytmów ewolucyjnych, które zostały wykorzystane w algorytmie hEP/N,
- przegląd ewolucyjnych metod wyznaczania ścieżek przejść dla obiektów morskich.

W rozdziale piątym przedstawiano hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść oraz algorytm hEP/N. W rozdziale zawarto:

- wprowadzenie do hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść,
- schemat działania algorytmu hEP/N,
- wymagane dane wejściowe,
- wyznaczanie hierarchii statków w oparciu o przepisy COLREG,
- opis wyznaczania zbioru bezpiecznych ścieżek przejść dla statków w obserwowanym środowisku z uwzględnieniem:
 - odwzorowania środowiska w hEP/N,
 - poszukiwania i oceny wyznaczonych ścieżek przejść,
 - opisu wykorzystanych modyfikacji algorytmów ewolucyjnych,
- sposób realizacji wyznaczonego rozwiązania,
- porównanie hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść z metodą ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii (Szłapczyński 2012b).

W rozdziale szóstym przedstawiono badania wykonane w celu weryfikacji algorytmu hEP/N. Przeprowadzono je wykorzystując różne scenariusze morskich sytuacji kolizyjnych.

W rozdziale siódmym przedstawiono podsumowanie pracy oraz opis możliwych perspektyw rozwoju hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść.

W ramach uzupełnienia treści poszczególnych rozdziałów w dodatkach zawarto:

- wybrane definicje oraz przepisy COLREG,
- opis elektronicznych map nawigacyjnych ECDIS – ang. electronic chart display and information system),
- opis systemu ARPA,
- opis systemu AIS z uwzględnieniem:
 - podstawowych parametrów,
 - wymagań technicznych,
 - informacji dostępnych w systemie AIS,
 - analizy ruchu statków z wykorzystaniem systemu AIS,
 - analizy jakości danych pozyskiwanych z systemu AIS,

- opis systemu LRiT,
- opis systemu VTMiS,
- etapy spotkania statków w sytuacji kolizyjnej,
- prezentację parametrów statków, które zostały wykorzystane w scenariuszu testowym VII i VIII.

2 Wspomaganie decyzji nawigacyjnych w obszarze o dużym natężeniu ruchu

W rozdziale zawarto definicję obszaru o dużym natężeniu ruchu, dla którego opracowano hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść. Metodę tą wykorzystuje się w algorytmie hEP/N, który stanowi system wspomaganie decyzji dla osoby nadzorującej ruchem statków na takim obszarze. W rozdziale zdefiniowano również system wspomaganie decyzji na morzu oraz przedstawiono przegląd metod zbliżonych do hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść.

2.1 Obszar o dużym natężeniu ruchu – obszar objęty nadzorem systemu VTS

Jednymi z trudniejszych rejonów żeglugi morskiej, szczególnie ze względu na bezpieczeństwo, są obszary o dużym natężeniu ruchu, czyli podejścia do portów, cieśniny, kanały itp. W literaturze nie znaleziono precyzyjnej definicji obszaru o dużym natężeniu ruchu morskiego. W dokumentach organizacji IMO (ang. International Maritime Organization – Międzynarodowa Organizacja Morska) (Czarny 2008) termin ten pojawia się w rezolucji (IMO 1997), gdzie w punkcie 3.2.2 (rozdział „Planowanie i wdrażanie systemów VTS”) określa się, że jednym z kryteriów decyzji o budowie systemu VTS jest „duże natężenie ruchu morskiego”, nie precyzując jednak, jak mierzyć ten parametr. W wypadku braku liczbowej definicji tego terminu, w pracy przyjęto, że jest to obszar nadzorowany przez system VTS (Jurdziński 2003). Dlatego też hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść zaprojektowano jako system wspomaganie decyzji rozszerzający funkcjonalność systemu VTS. Metoda ta przeznaczona jest dla operatora systemu VTS i ma za zadanie wspomaganie wyboru optymalnych strategii rozwiązywania oraz optymalizacji ruchu morskiego dla typowych oraz awaryjnych sytuacji nawigacyjnych.

System VTS jest to system kontroli ruchu statków wprowadzony przez upoważnione władze danego państwa, aby zapewnić bezpieczeństwo, efektywność żeglugi oraz ochronę środowiska naturalnego poprzez oddziaływanie na ruch statków i reagowanie na sytuacje nawigacyjne odbywające się w rejonie obserwacji (IMO 2002). W rezolucji (IMO 1997) zaleca się wykorzystanie systemów VTS w rejonach portów, kanałów podejściowych do portów oraz innych obszarach o dużym natężeniu ruchu. Systemy te, zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w rezolucji (IMO 1997), powinny być również ustalane w rejonach trudnych nawigacyjnie oraz wrażliwych na zagrożenia ekologiczne w związku z przewozami ładunków niebezpiecznych. W tekście uchwały (IMO 2002) podkreślono, że na terenach objętych nadzorem ruchu za decyzje związane z prowadzeniem nawigacji oraz za manewrowanie statkiem odpowiada kapitan.

Do funkcji służby VTS należą:

- a) funkcja informacyjna – ma na celu zapewnienie dostępności informacji o podstawowym znaczeniu dla bezpieczeństwa i efektywnego ruchu statków załogom tych statków i pilotom,
- b) funkcja asysty nawigacyjnej – polega ona na udzielaniu z centrum VTS informacji celem pomocy załodze statku lub jej pilotowi przy podejmowaniu decyzji dotyczących nawigacji oraz monitorowania skutków wynikowych manewrów,
- c) funkcja organizacji ruchu – ma na celu zapobiegnięcie niebezpiecznym sytuacjom nawigacyjnym oraz zapewnienie bezpiecznego i efektywnego ruchu jednostek znajdujących się w obszarze działania danej służby.

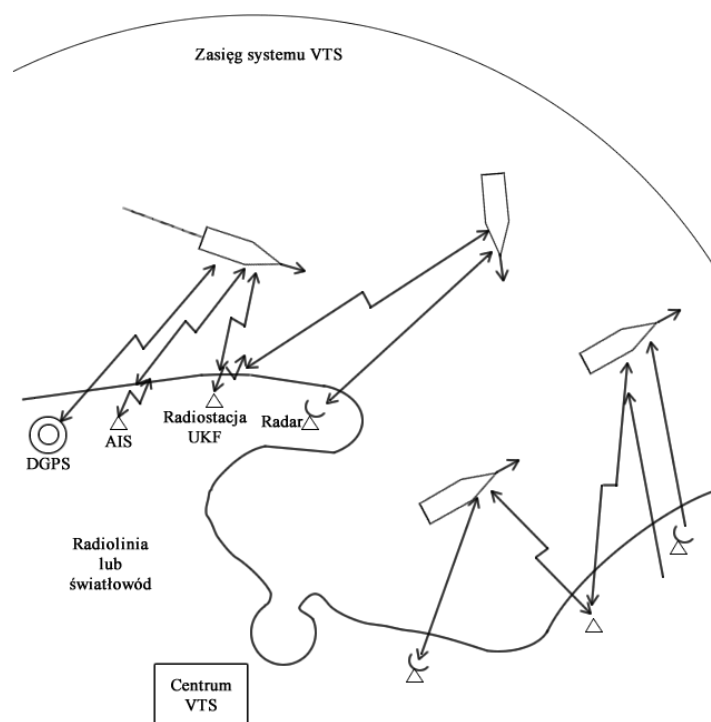
Wymienione funkcje mogą być pełnione zgodnie z wymaganiami jedynie po zapewnieniu następujących możliwości technicznych:

- a) odbiór meldunków składanych przez statki do centrów VTS zgodnie z wymaganiami i zaleceniami prawnie obowiązującymi na danym obszarze,
- b) odbiór i automatyczna prezentacja w centrum VTS danych z zainstalowanych systemów o aktualnych pozycjach jednostek pływających oraz bieżącej sytuacji nawigacyjnej i hydrometeorologicznej w obszarze działania danej służby,
- c) przekazywanie przez centrum VTS do statków znajdujących się w zasięgu jego działania stosownych informacji, porad oraz zaleceń.

Na rysunku 4 przedstawiono podstawowe elementy systemu VTS (Kopacz 2007):

- radary o określonym zasięgu warunkujące wielkość strefy działania danego systemu VTS,
- radiostacje UKF (Ultra Krótkich Fal) zapewniające łączności ze statkami,
- centrum zarządzania systemem VTS.

Stacje radarowe połączone są z centrum za pomocą radiolinii lub światłowodu.



Rysunek 4 – Główne elementy systemu VTS (Kopacz 2007).

Efektywność działania służb VTS zależy od niezawodności i aktualności danych przekazywanych za pośrednictwem radiostacji UKF, a także dokładności brzegowych urządzeń radarowych oraz układów śledzących znajdujących się na ich wyposażeniu. Parametry te zależą od wielkości monitorowanego akwenu, sytuacji nawigacyjnej danego obszaru oraz natężenia ruchu. Ważne jest,

aby wymienione wyżej informacje mogły być przesyłane, odbierane oraz czytelnie prezentowane automatycznie zarówno na statkach, jak i w systemach VTS za pośrednictwem systemu AIS.

Przykładem funkcjonującego systemu VTS jest stacja położona w rejonie Zatoki Gdańskiej (Świerczyński 2012). Na omawianym obszarze dane wejściowe przekazywane do centrum VTS pochodzą z sieci radarowych stacji brzegowych.

System identyfikacji i śledzenia VTS Zatoka Gdańska działa z wykorzystaniem:

- pięciu radarów brzegowych rozmieszczonych wokół Zatoki Gdańskiej (znajdujących się na latarni morskiej w Helu, Kapitanacie Portu Gdynia, Kapitanacie Portu Gdańsk, wieży radarowej Górki Zachodnie oraz latarni morskiej w Krynicy Morskiej),
- systemu automatycznej identyfikacji statków (AIS) wykorzystującego stację bazową na latarni morskiej Hel,
- urządzeń RDF (ang. Radio Direction Finder – Radionamiernik) na latarniach Hel i Krynica Morska,
- kamer wizyjnych CCTV (ang. Closed-Circuit Television – telewizja przemysłowa),
- sensorów hydrometeorologicznych,
- systemu obowiązkowych meldunków z wykorzystaniem UKF.

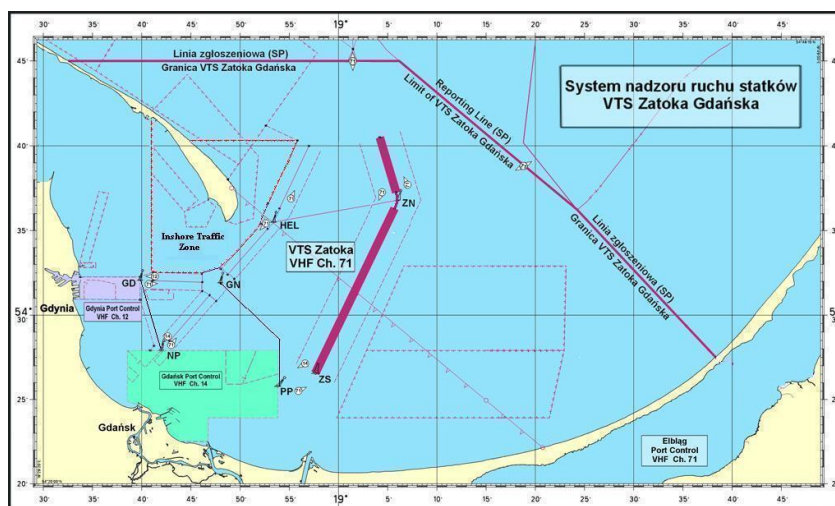
Obszar objęty działaniem systemu VTS Zatoka Gdańska przedstawia rysunek 5. Stanowi on strefę wyznaczoną przez linie graniczne systemu zgłaszania statków GDANREP¹, określoną współrzędnymi geograficznymi:

$$\varphi = 54^{\circ}45,00'N - \lambda = 018^{\circ}32,56'E$$

$$\varphi = 54^{\circ}45,00'N - \lambda = 019^{\circ}06,10'E$$

$$\varphi = 54^{\circ}36,20'N - \lambda = 019^{\circ}24,20'E$$

$$\varphi = 54^{\circ}27,49'N - \lambda = 019^{\circ}38,30'E$$



Rysunek 5 – Obszar działania systemu VTS Zatoka Gdańska (Świerczyński 2012).

¹ Obowiązkowy system zgłaszania statków obowiązujący w obszarze VTS, przyjęty zgodnie z prawidem 11 rozdziału V Konwencji SOLAS przez organizację IMO ustanowiony w rejonie Zatoki Gdańskiej (Urząd Morski w Gdyni 2008).

2.2 System wspomaganie decyzji na morzu

Decydent poruszający się w obszarze o dużym natężeniu ruchu powinien prowadzić statek po możliwie najkrótszej drodze oraz zapewnić bezpieczeństwo jednostki, a jego wybór powinien być racjonalny i możliwy do realizacji (Śmierchalski 1998). Tylko od jego doświadczenia i wiedzy zależy, czy podjęta w danym momencie decyzja będzie spełniać przedstawione założenia.

Narzędzie techniczne, które ma za zadanie pomóc decydentowi wybrać optymalne rozwiązanie, stanowi system wspomaganie decyzji (DSS – ang. Decision Support System) (Makowski 2001). Jego zadanie polega na wskazaniu w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych tych najkorzystniejszych według założonych kryteriów. W większości przypadków problem podjęcia decyzji można sprowadzić do optymalizacji wielokryterialnej, gdzie cele definiuje wektor kryteriów. Proces ten odbywa się przy pomocy modeli symulacyjnych analizowanego procesu. Jakość i przydatność otrzymywanych rozwiązań zależy zatem od stopnia dokładności odwzorowania danego procesu w środowisku symulacyjnym, ale również od zastosowanej metody i numerycznych procedur poszukiwania optimum. Aby uzyskać wiarygodne rozwiązania, konieczne jest więc prawidłowe określenie oraz weryfikacja modelu z procesem rzeczywistym. Nadmierne uproszczenie w procesie symulacji może skutkować nieprawidłowymi wynikami. Komputerowe metody wspomaganie decyzji dostarczają danych obejmujących (Śmierchalski 1998):

- lokalizację obszaru rozwiązań,
- wrażliwość rozwiązania na parametry,
- zgodność modelu z rzeczywistym procesem,
- zakres, w jakim rozwiązania zadania z zastosowaniem uproszczonego modelu mogą być wykorzystane w zagadnieniu praktycznym.

System wspomaganie decyzji w środowisku morskim rozszerzający funkcjonalność systemu VTS, który spełnia powyższe warunki, ma za zadanie wyznaczyć ścieżki przejścia dla każdego statku znajdującego się w obserwowanym obszarze. W wypadku braku zagrożeń nawigacyjnych dla danej jednostki, system ten wyznacza optymalną ścieżkę przejścia, która pozwoli danej jednostce dotrzeć do zadanego celu w najkrótszym czasie z uwzględnieniem zadanych ograniczeń (tory wodne, przeszkody statyczne). W przypadku wykrycia niebezpieczeństwa nawigacyjnego, system ten zapewni, że wyznaczona ścieżka przejścia będzie ścieżką bezpieczną, która pozwoli ominąć wykryte zagrożenie.

2.3 Systemy wspomaganie decyzji rozszerzające funkcjonalność systemów VTS

Jak podkreślono w pracy (Itoh 2003) istnieje konieczność używania systemu wspomaganie decyzji ze względu na udoskonalające się narzędzia pomiarowe i lokacyjne. Podkreśla się również nadmierną ilość danych widocznych dla operatora, która wymaga uporządkowania oraz wyszczególnienia kluczowych informacji. W tym celu można wykorzystać system wspomaganie decyzji. Hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść została opracowana jako system wspomaganie decyzji rozszerzający funkcjonalność systemu VTS. Niniejszy podrozdział obejmuje przegląd zbliżonych metod, które uwzględniają wyznaczanie bezpiecznych ścieżek przejść w obserwowanym środowisku.

Analiza literatury pozwoliła podzielić systemy wspomaganie decyzji rozszerzające funkcjonalność systemów VTS na dwie grupy:

- systemy wspomaganie decyzji wyznaczające ścieżki przejść wykorzystujące systemy ekspertowe,
- systemy wspomaganie decyzji wykorzystujące deterministyczne metody wyznaczania ścieżek przejść.

Dodatkowo przedstawiono opis inteligentnego systemu transportowego (Pietrzykowski 2011), którego budowa obejmuje system wspomaganie decyzji rozszerzający funkcjonalność systemów VTS. Praca nie opisuje jednak sposobu wyznaczania ścieżek przejść w omawianym systemie.

2.3.1 Systemy wspomaganie decyzji wyznaczające ścieżki przejść z wykorzystaniem systemów ekspertowych

System ekspertowy jest to system komputerowy, który ma za zadanie naśladować pracę eksperta (Chromiec 1994; Jackson 1986). W jego skład wchodzi trzy niezależne, współpracujące ze sobą moduły:

- baza wiedzy (ang. knowledge base), która obejmuje dane niezbędne do rozwiązania zadanego problemu,
- kontroler wywodu (ang. inference engine), który zawiera rozkazy, procedury oraz programy służące do wykorzystania oraz prezentacji wiedzy, reguł oraz faktów zawartych w bazie wiedzy w celu rozwiązania zadanego problemu,
- interfejs, który zajmuje się komunikacją ze światem zewnętrznym, czyli z użytkownikiem, i ma charakter urządzenia typu wejście/wyjście.

Ważną cechą systemów ekspertowych stanowi możliwość rozbudowy oraz modyfikacji danych zebranych w bazie wiedzy. Dzięki temu systemy te stanowią metodę uniwersalną i zdolną do adaptacji do zmian w kontrolowanych procesach. Wyznaczone rozwiązania zależą od jakości i ilości danych zgromadzonych w bazie wiedzy.

System ekspertowy wspomaganie decyzji na morzu, który rozszerza funkcjonalność systemów VTS, ma za zadanie gromadzić dane dotyczące dopuszczalnych manewrów w danym akwenie. Jednocześnie poszukuje się optymalnego manewru wzorcowego, który stanowiłby podstawę wyznaczania ścieżek przejść dla statków przepływających przez obserwowany obszar. Poniżej zaprezentowano trzy metody, które wykorzystują systemy ekspertowe do wyznaczenia bezpiecznych ścieżek przejść.

2.3.1.1 Metoda oparta na integracji systemów VTS oraz IGIS

W pracy (Popovich 2009) proponuje się wykorzystanie w systemie VTS zaawansowanych systemów IGIS (ang. Intelligent Geographic Information System – Inteligentny System Informacji Geograficznej) zawierających moduły systemu wspomaganie decyzji. Proponowana integracja umożliwia przeciwdziałanie zagrożeniom takim jak:

- ryzyko kolizji w obszarach o dużym natężeniu ruchu,
- aktywność piratów,
- zagrożenia terrorystyczne,
- ryzyko wypadków w portach i obszarach przybrzeżnych.

Inteligentną bazę danych IGIS można opisać jako powszechnie stosowany system GIS (ang. Geographic Information System – System Informacji Geograficznej) rozszerzony o dodatkowe inteligentne elementy takie jak:

- kontroler wyводу,
- podsystem scenariuszy,
- system manewrów wzorcowych jako podstawa bazy wiedzy.

Opisana metoda umożliwia wyznaczanie bezkolizyjnych ścieżek przejść przy wykorzystaniu bazy wiedzy i systemu Protégé (WWW – PRT), który jest narzędziem typu open-source.

Operatorowi systemu VTS zostaje przedstawione możliwe rozwiązanie danej sytuacji nawigacyjnej, które wykorzystuje zapisane w bazie wiedzy manewry wzorcowe. Aby zidentyfikować taki manewr, uwzględnia się następujące parametry:

- batymetrię,
- ryzyko nawigacyjne,
- oznakowanie toru wodnego,
- inne obiekty dynamiczne.

W przypadku braku informacji dla danego scenariusza nawigacyjnego, system obserwuje zachowanie statków, które biorą udział w danej sytuacji. Jej rozwiązanie zostaje zapisane w bazie wiedzy, gdzie może być edytowane przez operatora systemu.

Metoda ta wykorzystuje szereg nawigacyjnych modeli matematycznych opisujących m.in. wykrywanie i śledzenie obiektów oraz optymalizację ruchu morskiego. Modele te zapisane są w bazie wiedzy. Architektura tego rozwiązania umożliwia rozszerzanie jej o nowe funkcje i modele matematyczne. W artykule przedstawiono badania systemu przeprowadzone przy użyciu symulacji obszarów działania VTS w porcie Sankt Petersburg oraz w rejonie Zatoki Fińskiej.

Wadą metody opisanej w pracy (Popovich 2009), podobnie jak w większości podobnych metod, jest brak możliwości wyznaczenia bezpiecznej ścieżki przejścia w sytuacji awaryjnej. Systemy ekspertowe mogą nie posiadać w danym momencie danych dla określonego scenariusza, co uniemożliwia wskazanie rozwiązania. Z kolei jako zaletę warto wymienić liczbę czynników, które system uwzględnia, włączając w to bieżącą sytuację hydrometeorologiczną. W pracy nie podkreśla się konieczności przestrzegania prawideł COLREG. Zakładając jednak, że baza wiedzy zawiera jedynie dozwolone manewry, można przyjąć, że prawidła te są uwzględniane.

2.3.1.2 Wyznaczanie ścieżek przejść omijających obszary mielizny

Integracja systemu wspomagania decyzji z systemem VTS wykorzystująca systemy ekspertowe została opisana również w (Mazaheri 2012). W pracy porusza się problem wyznaczania ścieżek przejść pozwalających uniknąć wpłynięcia jednostki na mieliznę lub inne obszary zakazane. Podstawowym założeniem opisywanej metody jest wyznaczenie domeny bezpiecznej statku, która pozwoli zidentyfikować jednostki zagrożone wpłynięciem na mieliznę. Poprzez domenę bezpieczną statku należy rozumieć obszar wokół jednostki, którego naruszenie przez obiekty statyczne lub dynamiczne grozi kolizją lub unieruchomieniem statku własnego (ang. own ship – OS), czyli jednostki, na której podejmuje się akcję unikania kolizji z innym statkiem, nazywanym obiektem (ang. target ship – TS) (IMO 1979). W opisywanej metodzie wykorzystuje się następujące parametry statku, które pozwalają wyznaczyć jego domenę bezpieczną:

- charakterystyki silnika i steru,
- długość,
- długość i głębokość toru wodnego,
- doświadczenie decydenta,
- manewrowość,
- szerokość,
- prędkość,
- typ,
- warunki hydrometeorologiczne,
- zanurzenie.

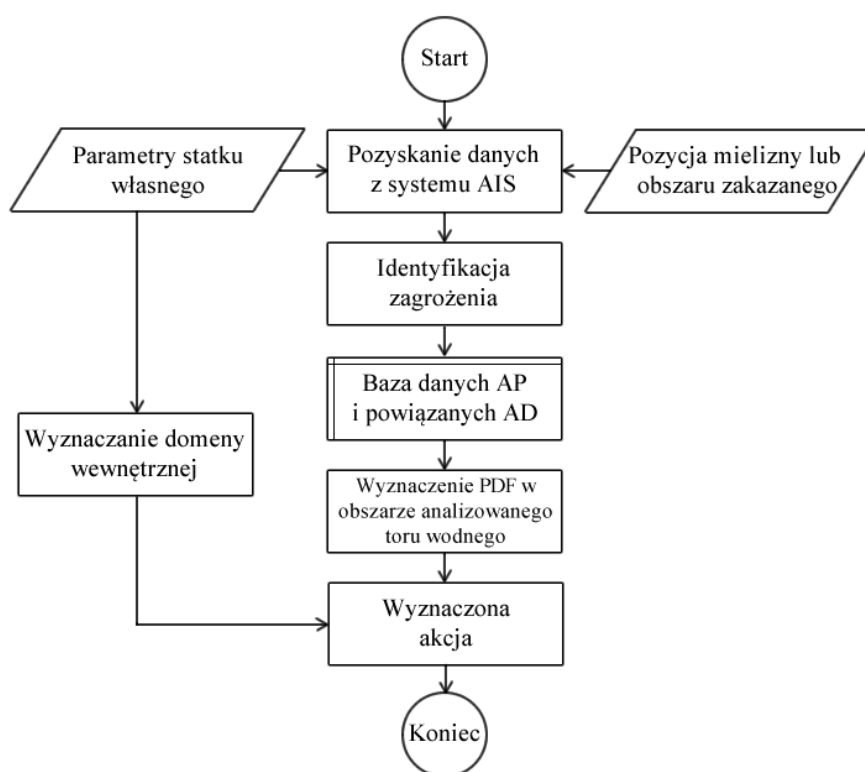
Ważne jest uwzględnienie trzeciego wymiaru (zanurzenia) w kontekście ustalania domeny bezpiecznej dla problemu unikania obszarów mielizny. Wyznaczony obszar zakazany dzieli się na dwie strefy – domenę wewnętrzną i zewnętrzną. Ta pierwsza ma ściśle określoną granicę opartą o charakterystykę dynamiczną statku. Jeżeli domena ta zostanie naruszona, wpłynięcie na mieliznę lub obszar zakazany staje się nieuniknione. Domena zewnętrzna nie jest stała, a określa się ją na podstawie pozycji i sytuacji nawigacyjnej danego statku. Nie stanowi wyznaczonego obszaru, ale zbiór punktów, w którym może nastąpić zmiana kursu pozwalająca na uniknięcie przeszkody.

Dane wejściowe pozyskuje się z systemu AIS. Pozwalają one określić prawdopodobieństwo wpłynięcia na obszary zakazane. Polega to na analizie danych statku własnego przesyłanych przez ten system. Uzyskane informacje porównuje się z wzorcowymi danymi jednostek zgromadzonych w bazie wiedzy. Pozwala to określić punkt, w którym statek musi zmienić kurs w celu uniknięcia niebezpieczeństwa. Miejsce to nazywane jest punktem akcji (AP – ang. Action Point), a dystans statku do tego punktu – odległością akcji (AD – ang. Action Distance). Następnie informacje dotyczące punktów AP i AD statku własnego są zapisywane w systemie, w wyniku czego tworzy się funkcję gęstości prawdopodobieństwa (PDF – ang. Probability Density Function) punktów AD. Umożliwia to ocenę szansy wpłynięcia na obszar zakazany danej jednostki na podstawie zapisanych w bazie danych manewrów wzorcowych. W oparciu o otrzymane rozwiązanie, operator VTS może doradzić decydentowi optymalną pozycję, w której należy zmienić kurs w celu uniknięcia obszaru zakazanego. Algorytm wyznaczania wymaganego manewru został przedstawiony na rysunku 6.

Wzorec statku może być określony na podstawie różnych parametrów dostępnych w systemie AIS. Im więcej parametrów zostanie uwzględnionych przy klasyfikowaniu jednostek, tym wskazania systemu wspomagania decyzji będą cechować się większą niezawodnością. Klasyfikowanie przy pomocy znacznej liczby parametrów wiąże się jednak z koniecznością obsługi rozbudowanych baz

danych, co może skutkować zarówno trudnościami technicznymi, jak również długim czasem obliczeń. Założenia pracy zweryfikowano za pomocą badań opartych na analizie archiwalnych danych rzeczywistych pozyskanych z systemu AIS dla ruchu tankowców w rejonie toru wodnego prowadzącego do portu miasta Sköldvik w Finlandii.

Wadą przedstawionego rozwiązania jest brak modeli matematycznych przedstawionych założeń oraz konieczność efektywnej obsługi rozbudowanej bazy danych. Również i w tym przypadku istnieje ryzyko, że metoda nie będzie mogła wyznaczyć rozwiązania w przypadku sytuacji awaryjnej, gdyż nie będzie posiadała danych statystycznych pozwalających na identyfikację i interpretację danego scenariusza nawigacyjnego. Trudnością może okazać się również znalezienie kompromisu między liczbą danych potrzebnych do grupowania statków a niezawodnością metody pracy (Popovich 2009).



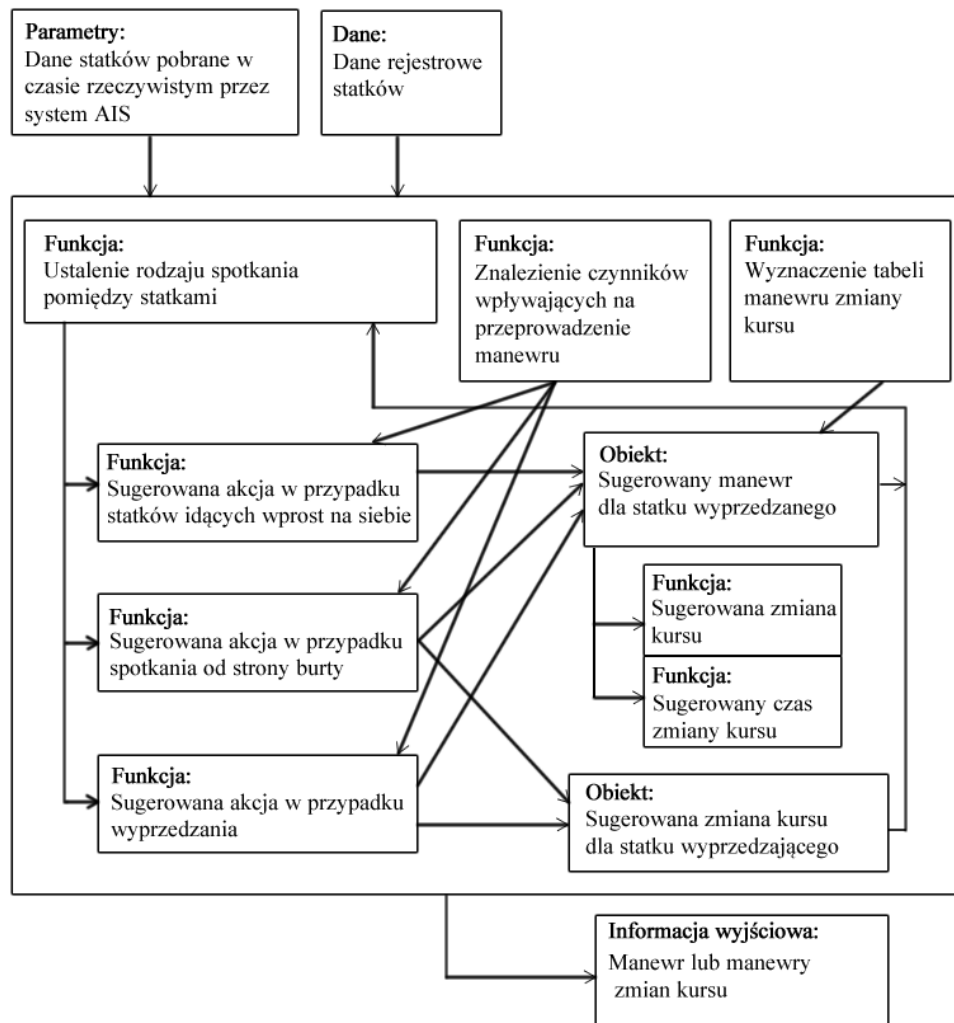
Rysunek 6 – Algorytm określania manewru uniknięcia obszaru zakazanego przedstawiony w pracy (Mazaheri 2012).

2.3.1.3 Rozmyty system decyzyjny unikania kolizji

Kolejny przykład systemu wspomagania decyzji dla systemu VTS został przedstawiony w pracy (Chien-Min 2012). Przy użyciu proponowanej metody możliwa jest analiza prawdopodobieństwa kolizji i wywołanie alarmu w przypadku zagrożenia. Metoda ta wykorzystuje bazę danych prawideł COLREG. W przypadku spotkania dwóch statków, zostaje wyznaczony manewr uniknięcia kolizji. Wykorzystuje się rozmyty system nadzoru, który wyznacza domenę bezpieczną statku mijanego. Metoda ta określa również optymalną procedurę zmiany kursu dla statku mijającego. Pozwala to na bezpieczne rozwiązanie danej sytuacji nawigacyjnej. Schemat działania wykorzystanej w pracy bazy wiedzy CAKB (ang. Collision Avoidance Knowledge Base – Baza wiedzy unikania kolizji) przedstawiono na rysunku 7.

Przy wyborze manewru uniknięcia kolizji uwzględnia się jedynie możliwość zmiany kursu z pominięciem możliwości zmiany prędkości. Praca opisuje również integrację systemów VTS, AIS oraz MGIS (ang. Marine Geographic Information System – Morski Geograficzny System Informacji). Pozwala to wyznaczyć optymalny manewr uniknięcia kolizji oraz język danych wejściowych dla systemu logiki rozmytej poprzez hierarchiczny proces analityczny. Badania różnych sytuacji kolizyjnych przeprowadzane zostały na symulatorze SA PILOTSHIP 2000.

Rozmyty system decyzyjny posiada cechy zbliżone do wcześniej opisanych metod wykorzystujących systemy ekspertowe. Warto jednak podkreślić, że w metodzie opisanej w (Chien-Min 2012) wyraźnie zaznacza się uwzględnianie prawideł COLREG w procesie wyznaczania ścieżek przejść.



Rysunek 7 – Schemat wyznaczania decyzji CAKB (Chien-Min 2012).

2.3.2 Systemy wspomaganie decyzji z wykorzystaniem deterministycznych metod wyznaczania ścieżek przejść

Metody deterministyczne wyznaczają ścieżkę przejścia według ściśle określonej matematycznej procedury. Oznacza to, że dla tych samych danych wejściowych na wyjściu algorytmu otrzyma się zawsze takie samo rozwiązanie.

W podrozdziale przedstawiono metody, które rozszerzają funkcjonalność systemów VTS o wyznaczanie bezpiecznych ścieżek przejść przy wykorzystaniu metod deterministycznych.

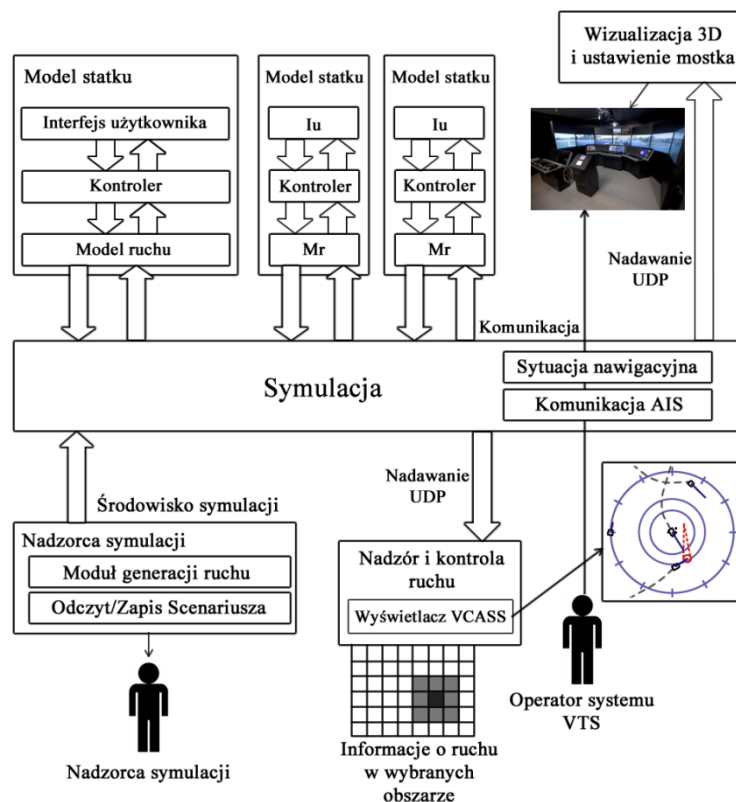
2.3.2.1 Algorytm koordynacji ruchu morskiego programu SEATRAS

W pracy (Itoh 2003) zaprezentowano projekt modelu (rysunek 8) oraz główne założenia algorytmu koordynacji ruchu morskiego wykorzystywanego w programie SEATRAS (ang. Sea Traffic Simulation – Symulator ruchu morskiego). Metoda wykorzystuje:

- algorytm wyznaczania ścieżek przejść przedstawiony w pracy (Numano 1987),
- wizualny system wspomaganie decyzji oparty na systemie VCASS (ang. Visualization-based Collision Avoidance Support System – graficzny system wspomaganie decyzji unikania kolizji),
- środowisko symulacyjne.

W przypadku wykrycia ryzyka kolizji, proponowany system wyświetla operatorowi wartość kąta zmiany kursu lub wartość zmiany prędkości konieczną do uniknięcia zderzenia (bez uwzględnienia prawideł COLREG) dla statku własnego.

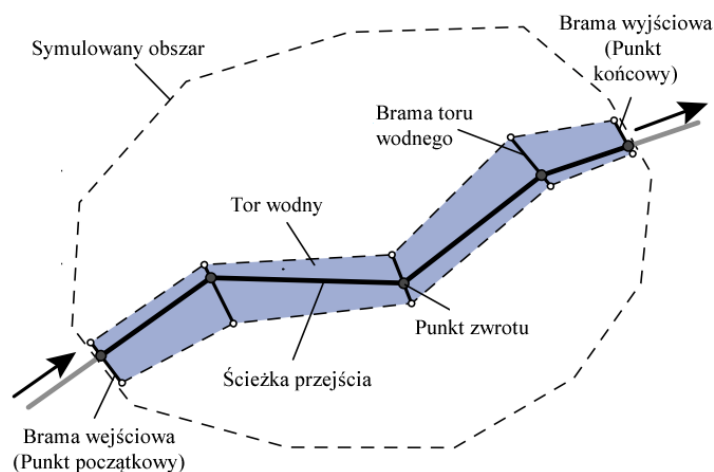
W pracy ścieżkę przejścia statku reprezentuje się jako krzywą łączącą dwa porty. Wierzchołki krzywej nazywane są punktami zwrotu. W punktach tych następuje zmiana kursu. Ruch statków zamodelowany został jako zbiór krzywych łączących punkty początkowe i docelowe jednostek znajdujących się w zasięgu systemu VTS oraz poruszających się po obszarze wyznaczonego toru wodnego. Jak przedstawiono na rysunku 9, tor wodny jest określony jako zbiór obszarów, przez które jednostka musi przepłynąć. Linia kończąca dany obszar nazywana jest bramą toru wodnego.



Rysunek 8 – Struktury systemu SEATRAS z wykorzystaniem systemu VCASS (Itoh 2003).

Dane środowiska zapisywane są w formacie XML. Pozwala to na pracę zarówno z użyciem danych rzeczywistych, jak i symulowanych. Dynamika statku została opracowana na podstawie modelu przedstawionego w pracy (Nomoto 1956). Unikanie kolizji wykorzystuje metodę geometryczną opisaną w (Pedersen 2002). Skuteczność programu SEATRAS badano wykorzystując symulację wypadku, który wydarzył się w Zatoce Tokijskiej w 1985 roku.

Wadę opisywanej metody stanowi nieuwzględnienie prawideł COLREG. Nie jest również sprecyzowane, czy wyznaczanie ścieżek przejść odbywa się dla wszystkich obserwowanych w systemie VTS statków czy jedynie dla wybranych jednostek.



Rysunek 9 – Tor wodny i zamodelowana ścieżka przejścia wykorzystana w pracy (Itoh 2003).

2.3.2.2 Wielokryterialny system wyboru drogi statku

W metodzie przedstawionej w (Szłapczyńska 2006) statek nawiązuje kontakt z operatorem systemu VTS przed wpłynięciem do obszaru obserwacji. Operator ten wykorzystuje omawianą metodę, aby wyznaczyć rozwiązanie zbliżone do optymalnego ze zbioru ścieżek alternatywnych dla danej jednostki. Następnie rozwiązanie to przekazywane jest decydentowi. Wybór ścieżki odbywa się na podstawie parametrów takich jak:

- długość ścieżki,
- ryzyko kolizji,
- warunki hydrometeorologiczne na trasie ścieżki.

Algorytm wyznacza ryzyko kolizji związane ze ścieżkami zbioru wejściowego. Ocena ryzyka jest wykonywana dla wybranego statku w relacji do innych obiektów w obserwowanym obszarze. Dla każdego elementu z rozpatrywanego zbioru przeprowadza się symulację oraz ocenę danego rozwiązania.

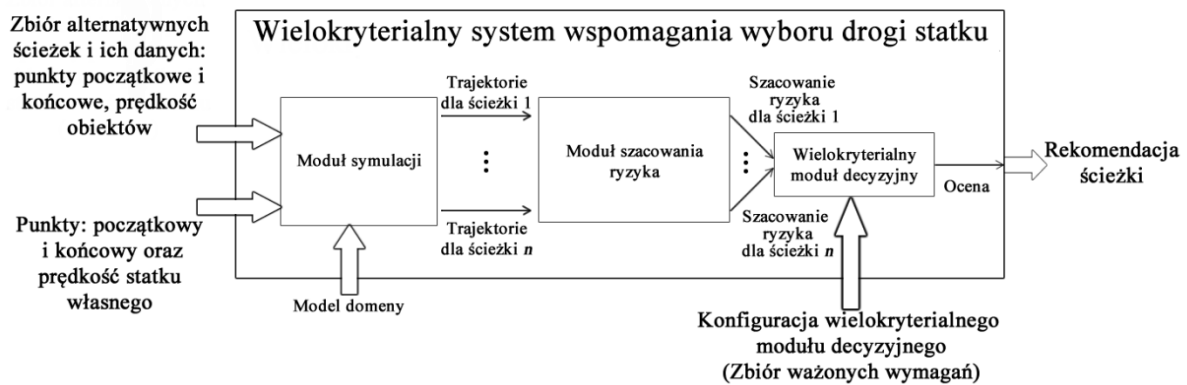
Celem modułu symulacji jest analiza trajektorii statku własnego oraz wyznaczenie obiektów, które reprezentują ryzyko kolizji. Moduł ten uwzględnia przepisy COLREG w procesie oceny ścieżek. Wraz z zakończeniem symulacji moduł szacowania ryzyka rozpoczyna analizę zbioru ścieżek przejść w celu wyznaczenia prawdopodobieństwa kolizji dla statku własnego. Przy założeniu wykorzystania domeny kołowej obiektów, ryzyko kolizji wyznacza się przy pomocy następującego wzoru (Lisowski 2001):

$$r_j = \left[a_1 f_{min}^2 + a_2 \left(\frac{T_{fmin}}{T_s} \right)^2 + a_3 f(t)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad 2.1$$

gdzie:

- | | |
|-----------------|---|
| r_j | – ryzyko kolizji między statkiem własnym a j -tym obiektem, |
| $f(t)$ | – parametr chwilowego zbliżenia statku własnego, |
| f_{min} | – parametr zbliżenia statku własnego, |
| T_{fmin} | – czas potrzebny do osiągnięcia wartości f_{min} statku własnego, |
| T_s | – czas bezpieczny potrzebny do wyznaczenia i przeprowadzenia manewru uniknięcia kolizji, |
| a_1, a_2, a_3 | – parametry opisujące wagę poszczególnych części równania zależne od warunków hydrometeorologicznych. |

W ostatnim kroku wielokryterialny moduł oceny uwzględnia dane opisujące każdą ze ścieżek z rozważanego zbioru i dokonuje ich oceny na podstawie wcześniej wyznaczonych parametrów. Proces ten został przedstawiony na rysunku 10.



Rysunek 10 – Struktura i przepływ informacji dla wielokryterialnego systemu wspomagającego wybór ścieżki statku (Szałpczyńska 2006).

Zaletą metody jest wyznaczanie ścieżek przejść, które przestrzegają prawideł COLREG. Opisany został również praktyczny sposób wykorzystania metody.

2.3.3 Inteligentny system transportowy

W pracy (Pietrzykowski 2011) przeprowadzono analizę procesu transportowego, opisując jednocześnie system NDSS (ang. Navigational Decision Support System – Nawigacyjny System Wspomagania Decyzji). Obejmuje on w swoim zakresie różne podsystemy związane z ruchem morskim. W procesie transportowym system umożliwia wspomaganie realizacji następujących zadań:

- automatyczne (lub za potwierdzeniem decydenta/operatora) przeprowadzenie manewru,
- interakcję z decydem lub nadzorcą ruchu przy pomocy interfejsu użytkownika,
- monitorowanie, analizę i ocenę sytuacji nawigacyjnej w warunkach niebezpiecznych oraz informowanie o bieżącym stanie bezpieczeństwa,
- planowanie, koordynację i nadzór nad ruchem statków, również przy użyciu systemu VTS,
- prezentację oceny sytuacji nawigacyjnej i proponowanego rozwiązania wyznaczonego przez system,
- przewidywanie sytuacji nawigacyjnych.

Dodatkowe moduły obejmują:

- dynamiczny system pozycjonowania,
- systemy dokujące,
- system nawigacji hydrometeorologicznej,
- system nawigacyjny pilota.

Jednym z modułów opisywanego systemu jest podsystem kontroli ruchu morskiego S_{MT} przeznaczony dla systemu VTS. Ma on na celu prowadzenie statków morskich zgodnie z ich zadaniami z uwzględnieniem parametrów założonego procesu. Powiązany moduł S_{MTr} zawiera elementy takie jak obszar, obiekty dynamiczne, sprzęt komunikacyjny oraz zasady poruszania się.

Praca (Pietrzykowski 2011) prezentuje jedynie teoretyczny opis systemu, nie przedstawiając szczegółów integracji z bieżącymi systemami identyfikacji i śledzenia jednostek morskich. Podkreśla się jednak ich wykorzystanie. W pracy brakuje również opisu metody wyznaczania ścieżek przejść oraz badań opisanej struktury. Warto jednak zauważyć rozszerzenie założeń systemu wspomagania decyzji poza system VTS. Takie podejście pozwala na potencjalne zwiększenie ogólnej efektywności procesu transportowego. Możliwą wadą metody jest jej złożoność, która zwiększa ekspozycję nadzorowanego procesu transportowego na błędy.

2.4 Podsumowanie

Przedstawiony w rozdziale 2 przegląd prac obejmuje metody rozszerzające funkcjonalność systemów VTS zbliżone do hierarchicznej metody wyznaczania ścieżek przejść. Poszukiwano metod, które uwzględniają wyznaczanie bezpiecznych ścieżek przejść w obserwowanym środowisku. Na podstawie analizy wybranych prac można przyjąć następujące wnioski:

- nie wszystkie metody uwzględniają przepisy COLREG w procesie wyznaczania ścieżek przejść (Itoh 2003),
- nie wszystkie przedstawione metody mają możliwość wyznaczania ścieżek przejść w sytuacji awaryjnej (Popovich 2009),
- niektóre analizowane metody nie precyzowały sposobu wyznaczania ścieżek przejść (Pietrzykowski 2011) lub ograniczały się do wyznaczania ścieżki przejścia dla pojedynczego statku znajdującego się w obszarze obserwacji systemu VTS (Mazaheri 2012; Szlarczyńska 2006),
- nie wszystkie prace wyznaczały optymalne ścieżki przejść (Itoh 2003),
- w przypadku rozwiązań wykorzystujących systemy ekspertowe, proces ten wymaga gromadzenia w czasie danych wejściowych, które nie muszą prowadzić do rozwiązań optymalnych lub zbliżonych do optymalnych,
- żadna z prezentowanych metod nie przedstawiła funkcjonalności, która pozwalałaby na jednoczesną optymalizację ścieżek przejść wielu statków w czasie zbliżonym do rzeczywistego,
- wszystkie opisane metody zakładają współpracę z innymi systemami (np. systemem AIS) w celu pobrania danych wejściowych.

3 Przegląd metod wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść

W poprzednim rozdziale określono definicję obszaru o dużym natężeniu ruchu oraz przedstawiono systemy wspomaganie decyzji rozszerzające funkcjonalność systemów VTS. Systemy te powinny mieć możliwość wyznaczania zbioru bezpiecznych ścieżek przejść dla statków znajdujących się w obserwowanym środowisku. Istnieje jednak wiele metod, które pozwalają wyznaczyć ścieżki przejść dla pojedynczego statku. Jest to zadanie wykonywane również przez hierarchiczną, ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść. Dlatego też w rozdziale przedstawiono metody wyznaczania ścieżek przejść dla pojedynczych jednostek.

W celu rozwiązania tego zadania potrzebne są metody dedykowane środowisku morskemu. Klasyczne metody wyznaczania ścieżek przejść (dla lądowych robotów mobilnych) nie uwzględniają bowiem prawideł COLREG oraz złożonych własności dynamicznych statków, które są zależne od wielu czynników (takich jak budowa statku czy zakłócenia hydrometeorologiczne). Nie powstała jednak dotychczas uniwersalna metoda uwzględniająca wszystkie wymagania stawiane procesowi wyznaczania ścieżek przejść w środowisku morskim (Tam 2009). Metody, które uwzględniają prawidła COLREG, dokonują tego wykorzystując wyspecjalizowane systemy ekspertowe lub koncepcję domeny bezpiecznej statku. Symulacja własności dynamicznych statku wykorzystuje uproszczony model dynamiczny lub dynamika nie jest uwzględniana.

Rozdział rozpoczął opisem wydarzeń, które zdeterminowały współczesny stan prawny regulujący proces unikania kolizji. Następnie przedstawiono przegląd metod wyznaczania manewru uniknięcia kolizji, ponieważ stanowi on element procesu wyznaczenia bezpiecznej ścieżki przejścia. Metody wyznaczania tych ścieżek podzielono na metody:

- deterministyczne,
- heurystyczne:
 - oparte o teorię zbiorów rozmytych,
 - algorytm mrówkowy,
 - wykorzystujące systemy ekspertowe,
 - wykorzystująca sieci neuronowe.

W rozdziale pominięto inną grupę metod heurystycznych, którą stanowią algorytmy ewolucyjne. Metoda ta stanowi podstawę hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść, co determinuje konieczność szczegółowego opisu oraz dedykowanego przeglądu ewolucyjnych metod wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść na morzu. Opis oraz przegląd tych metod zawarto w rozdziale 4.

3.1 Wprowadzenie

Na początku lat siedemdziesiątych stowarzyszenie The Liverpool Underwriters odnotowało 13.8% wzrost liczby kolizji morskich w ujęciu średniej z pięciu lat. Coraz częstsze zderzenia statków spowodowały, że w 1960 roku na Międzynarodowej Konferencji Bezpieczeństwa Życia na Morzu powołano Międzypaństwową Morską Organizację Doradczą (IMCO – ang. Intergovernmental Maritime Consultative Organisation), znaną obecnie jako IMO (Cockcroft 2001). Zajął się ona przygotowaniem serii konferencji, na których powoływano przepisy mające na celu zapobieganiu kolizjom. Jednym z pierwszych efektów jej prac było rozdzielenie ruchu morskiego w Cieśninie Kaletańskiej w 1967 roku. Niestety rozwiązanie wykorzystane w tej cieśninie obejmowało jedynie ruch jednostronny, nie uwzględniało natomiast obszarów o ruchu dwustronnym lub swobodnym.

Kluczowa z perspektywy współczesnych przepisów okazała się konferencja COLREG z 1972 roku, która opisała prawa regulujące zachowanie statków w sytuacji kolizyjnej. Nazwa pochodzi od angielskiego zwrotu „COLLision REGulations” (regulacje dotyczące unikania kolizji).

Wczesniejsze publikacje dotyczące problemu unikania kolizji można podzielić na trzy grupy (Tam 2009):

- a) analiza ruchu morskiego,
- b) wyznaczanie optymalnych manewrów unikania kolizji,
- c) wyznaczanie pozycji potencjalnej kolizji dwóch statków (PPC – ang. potential point of collision).

Prace przedstawione po konferencji COLREG opisują proces wyznaczania manewru unikania kolizji lub ścieżki przejścia statku najczęściej w oparciu o uchwalone prawa. Należy podkreślić, jedynie metody uwzględniające prawa COLREG mogą być wykorzystane we współczesnych systemach nawigacji.

3.2 Metody wyznaczania manewru unikania kolizji

Elementem procesu wyznaczania ścieżek przejść na morzu jest określenie manewru unikania kolizji. Proces ten opisano w pracy (Calvert 1960), gdzie zaprezentowano koncepcję manewrów na prawą burzę w taki sposób, że horyzont subiektywny zawsze obraca się w kierunku przeciwnym do kierunku wskazówek zegara. Następnie zaproponowano użycie tej techniki w praktyce z wykorzystaniem radaru (Wylie 1960). Rok później metoda ta znalazła matematyczne uzasadnienie w innej pracy (Hollingdale 1961). Od tego czasu pojawiło się kilka publikacji zajmujących się analizą procesu unikania kolizji (Morrel 1961; Wylie 1962). W 1968 roku opracowano elektryczno-mechaniczny analogowy komputer (Mitrofanov 1968), który na podstawie ręcznie wprowadzanych danych wyznacza manewr uniknięcia zderzenia z wykorzystaniem modelu matematycznego. Model ten uwzględnia kurs i prędkość dwóch zbliżających się do siebie statków.

W pracy (Jones 1974) przedstawiono diagram manewrów. Pokazuje on ilustrację mostka na statku oraz wyznacza obszary ryzyka kolizji z zastosowaniem geometrii analitycznej oraz prawdopodobieństwa wykonania danego manewru przez obiekt. Ma on na celu wyszczególnienie obszarów wysokiego ryzyka kolizji, reprezentowanego przez rejony pokrywające się z diagramami innych statków. Podobny diagram zaprezentowano w pracy (Cockfort 1972). W artykule (Merz 1976) opublikowano badania na temat spotkania dwóch statków na otwartym morzu. W pracy zaproponowano model trygonometryczny i sposób obliczania maksymalnej odległości bezpiecznej

między dwoma statkami. Model ten używa danych radarowych takich jak położenie i względna prędkość oraz zwrotność statku z pominięciem innych własności takich jak dynamika obiektu czy wpływ środowiska. W pracy (James 1986) możliwości uniknięcia kolizji podzielono względem odległości i wzajemnej pozycji statków. Pozwala to na wyznaczenie bezkolizyjnych ścieżek przejść z uwzględnieniem prawideł COLREG dla dwóch statków. W pracy (Degre 1981) przedstawiono system unikania kolizji z zastosowaniem „przestrzeni manewrowej” (ang. „room to manoeuvre”). Rozwiązanie to, podobnie jak diagramy manewrowe, wykorzystuje model geometryczny, który w tej metodzie tworzy obszary niebezpieczne z uwzględnieniem wektorów prędkości oraz maksymalnej odległości mijania. Przestrzeń uznana za bezpieczną znajduje się poza zakreślonym obszarem, gdzie ryzyko kolizji jest pomijalne. Prezentowany system nie uwzględnia jednak prawideł COLREG. Inną pracą zajmującą się wyznaczeniem bezpiecznych ścieżek przejść z użyciem geometrii analitycznej jest artykuł (Pedersen 2002). Metoda wykorzystuje wektory prędkości statku własnego i obiektu oraz wyznacza się CDL (ang. Collision Danger Line – linię zagrożenia kolizyjnego) oraz obszary CDS (ang. Collision Danger Sector – obszar zagrożenia kolizyjnego). Obszary te reprezentują różne poziomy zagrożenia kolizją. Każdy manewr, którego wektor prędkości kończy się w obszarze CDS, może zakończyć się zderzeniem statków. Zadaniem decydenta jest sterowanie jednostką w sposób, który pozwoli jej opuścić ten obszar. Metoda ta pozwala jedynie na wizualizację sytuacji kolizyjnej oraz skutków działań wykonanych celem uniknięcia zderzenia. Nie wyznacza jednak manewrów uniknięcia kolizji. Istnieje również ryzyko, że wizualizacja stanie się nieczytelna w wypadku dużej liczby obiektów.

Grupę prac wykorzystujących teorię gier różniczkowych rozpoczął artykuł (Miloh 1977). Teoria ta została później wykorzystana w pracach (Lisowski 1978; Kudriaszow 1979) oraz rozwinięta w artykułach (Gawrychowski 1984a, 1984b). Z kolei w publikacji (Cannell 1981) wyznaczanie manewru antykolizyjnego zamodelowano jako jednopoziomową grę kooperacyjną. Jej celem jest maksymalizacja bezpieczeństwa poprzez uniknięcie zderzenia. Praca definiowała bezpieczeństwo wykorzystując macierz prawdopodobnych manewrów statku. Algorytm poszukuje strategii, w której nie dochodzi do kolizji uczestników gry.

Istnieje również szereg prac, które wykorzystują domenę bezpieczną statku. Metoda ta została przedstawiona po raz pierwszy w artykule (Fujii 1971). W innej publikacji (Dove 1986) domenę opisaną w (Colley 1983) zastosowano do wyznaczenia bezpiecznej trajektorii dla automatycznego systemu nawigacji. W artykule (Colley 1984) wykorzystano model RDRR (nazwa pochodzi od wykorzystanego kryterium Range to Domain over Range-Rate). W artykule opisuje się działanie, w którym manewr uniknięcia kolizji rozpoczyna się z chwilą naruszenia domeny bezpiecznej statku. Kiedy do tego dojdzie, przeprowadza się zwrot na prawą burtę do chwili, gdy obiekt przestanie znajdować się w domenie bezpiecznej statku własnego. W tym momencie powinien nastąpić powrót na oryginalny kurs. Sytuacje nawigacyjne z większą liczbą jednostek podzielono na podzbiory zdarzeń z dwoma statkami. Rozwiązywane są one w kolejności zależnej od stopnia ryzyka kolizji. Wadą tego rozwiązania jest pomijanie w niektórych przypadkach obiektów o niskim prawdopodobieństwie zderzenia ze statkiem własnym.

Dość liczną grupę metod stanowią te oparte o teorię zbiorów rozmytych. W artykule (Smeaton 1990) przedstawiono algorytm, który w obliczeniach uwzględnia typ zbliżenia statków oraz parametrów: najmniejszej odległości zbliżenia do obiektu (CPA – ang. Closest Point of Approach) oraz czasu do wystąpienia tej odległości (TCPA – ang. Time to Closest Point of Approach). W pracy (Burns 1999) również zaproponowano rozwiązanie zagadnienia zachowania się zespołu statków w sytuacji kolizyjnej poprzez zastosowanie rozmytych reguł sterowania. W artykułach (Perera 2009a, 2009b) autorzy opracowali funkcję przynależności wykorzystującą domenę bezpieczną statku własnego w celu uniknięcia kolizji z innymi obiektami. Sformułowano system decyzyjny oparty na

zbiorze zasad rozmytych, które uwzględniają zarówno zasady organizacji IMO, jak i przepisy COLREG.

Kolejną grupę metod stanowią rozwiązania wykorzystujące systemy ekspertowe. W artykule (Coenen 1989) zaprezentowano system doradztwa nawigacyjnego, który wyznacza manewry antykolizyjne na podstawie przepisów COLREG, skatalogowanych opinii ekspertów oraz praktyk morskich. System ten, wykorzystując informacje zgromadzone w bazie danych, wyznacza opisowe rozwiązania antykolizyjne zawierające:

- kurs,
- wartość zmiany kursu,
- moment zmiany,
- moment powrotu na kurs początkowy.

Wymienione powyżej informacje wyjściowe przekazywane są decydentowi w formie opisowych wiadomości, np. „Pozostań na kursie” lub „Zmień kurs w kierunku prawej burty”. W pracy (Iijima 1991) przedstawiono rozwój inteligentnych systemów na statkach, służących wyznaczeniu i wykonaniu manewru antykolizyjnego. Autorzy opracowali system ekspertowy prowadzenia nawigacji. Opisana autonomiczna metoda unikania kolizji pozwala na oszacowanie sytuacji nawigacyjnej na podstawie danych radarowych i mapy elektronicznej.

W 2003 roku zaproponowano metodę proporcjonalnej nawigacji (Wilson 2003). Metoda ta, wcześniej wykorzystana jako sposób sterowania pociskiem, pomija jednak przepisy COLREG i wiąże się z niepraktycznymi założeniami związanymi ze zmianą wektora prędkości statku własnego.

3.3 Metody wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść

3.3.1 Metody deterministyczne

Pierwszą z grup metod wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść stanowią metody deterministyczne, gdzie wyznaczanie ścieżki przejścia odbywa się według ściśle określonej matematycznej procedury. Proces ten często wiąże się z długim czasem obliczeń.

W pracy (Chang 2003) zaproponowano wykorzystanie wykresów rastrowych opartych na algorytmie nawigacji przez labirynt (ang. maze-routing). Zastosowano okrągłe, dyskretyzowane domeny bezpieczne statku do zbudowania przestrzeni przeszkód, gdzie domeny zarówno obiektów, jak i statku własnego przesuują się do przodu w zależności od wielkości ich wektorów prędkości. Jeżeli dana komórka wyznaczonego labiryntu jest zajęta lub częściowo zajęta przez domenę bezpieczną obiektu, staje się ona obszarem zakazanym dla statku własnego. Tylko jeden obiekt może znaleźć się w pojedynczej komórce w dowolnym momencie czasu. W pracy przewidziano również sytuację kolizji z wieloma jednostkami poprzez wykorzystanie domeny dynamicznej do wyznaczenia optymalnej ścieżki.

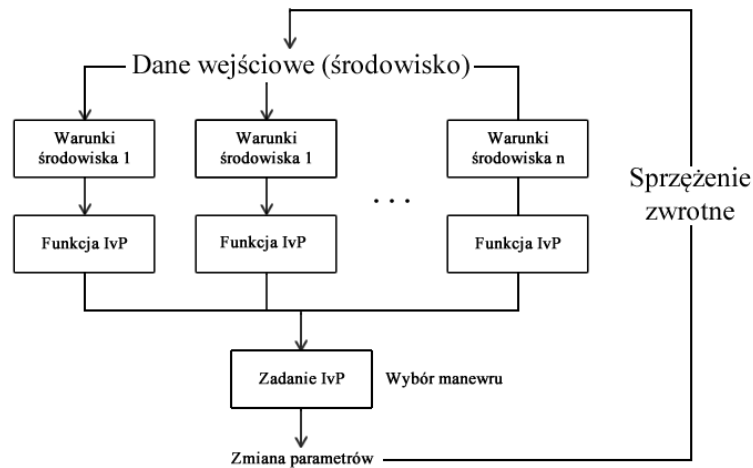
Metodę tę rozwinęto w pracy (Szląpczyński 2006) o zależne czasowo obszary zakazane, możliwość zmniejszenia prędkości statku własnego oraz opóźnienie oczekiwanego czasu przybycia do celu przy każdej zmianie kursu. Dany obszar labiryntu uznany jest za zakazany jedynie w przedziale czasu, w którym znajduje się w nim obiekt. Dzięki temu statek własny ma możliwość przebycia wąskich przejść takich jak kanały czy cieśniny. Dzieje się tak, gdyż przeszkoda dynamiczna znajduje się w określonym obszarze jedynie w danym momencie czasu, pozwalając innemu obiektowi zająć tę samą komórkę labiryntu, gdy jest ona wolna. Redukcję prędkości wykorzystuje się w wypadku, gdy manewrowanie nie przynosi oczekiwanych rezultatów. Algorytm przeszukiwania binarnego określa minimalną redukcję prędkości konieczną do uniknięcia kolizji. Warto zauważyć, że zmianę tę uwzględnia się jedynie dla statku własnego.

W pracy (Churkin 1998) zaprezentowano rozwiązanie matematycznego modelu wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść z użyciem zarówno metod ciągłych, jak i dyskretnych. Metoda ciągła opiera się na programowaniu liniowym mającym na celu minimalizację kosztu odchylenia od kursu. Z kolei metoda dyskretna wyznacza rozwiązanie poprzez dyskretyzację kursu i ocenia ścieżkę przy każdym punkcie zwrotu z użyciem metody podziału i ograniczeń (ang. branch and bound). Metoda ciągła może wymagać zbyt dużej mocy obliczeniowej i nie nadaje się do przypadków, gdy wiele statków znajdzie się na kursie kolizyjnym jednocześnie. Wymaga bowiem skomplikowanych modeli matematycznych, aby opisać takie scenariusze.

W artykule (Hong 1999) przedstawiono automatyczny, bezkolizyjny system nawigacji trajektorii i kontroli z wykorzystaniem algorytmu rekurencyjnego. Sposób unikania kolizji oparty jest na geometrii analitycznej oraz metodzie zbioru wypukłego, gdzie sekwencja poleceń zmiany kursu stanowią rekurencyjnie wyznaczone punkty zwrotu. Znajdują się one w bliskim sąsiedztwie statku własnego, który jest zamknięty w obszarze wolnym od przeszkód. Obszary te tworzone są za pomocą metody zbiorów wypukłych poprzez dekompozycję. W metodzie tej średnia odległość od przeszkód wykorzystywana jest w celu nawigacji bezkolizyjnej. Jest to metoda teoretyczna, gdyż w praktyce morskiej nie steruje się statkiem w taki sposób.

Inne podejście do problemu wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść zaprezentowano w pracy (Benjamin 2004). Omawiany system nawigacyjny został przygotowany dla zautomatyzowanego statku. Zastosowano architekturę sterowania wykorzystującą model wielokryterialnej optymalizacji IvP (ang. Interval Programming) w procesie wyznaczania bezpiecznych ścieżek zgodnych z prawidłami COLREG. Wybór sposobu uniknięcia kolizji wykonuje się w obrębie „przestrzeni

manewrów” (rysunek 11) z uwzględnieniem warunków hydrometeorologicznych. Pojęcie to obejmuje zbiór możliwych manewrów zakładających zmianę prędkości, kursu, zanurzenia lub ich kombinacji. Rezultatem każdorazowej analizy warunków środowiska jest funkcja celu, która ocenia możliwości uniknięcia kolizji w odniesieniu do prawideł COLREG. Szczegóły rozwiązywania wielokryterialnych zadań optymalizacyjnych z wykorzystaniem modelu IvP opisano w (Benjamin 2002).



Rysunek 11 – Architektura sterowania wykorzystująca model wielokryterialnej optymalizacji IvP (Benjamin 2004).

3.3.2 Metody heurystyczne

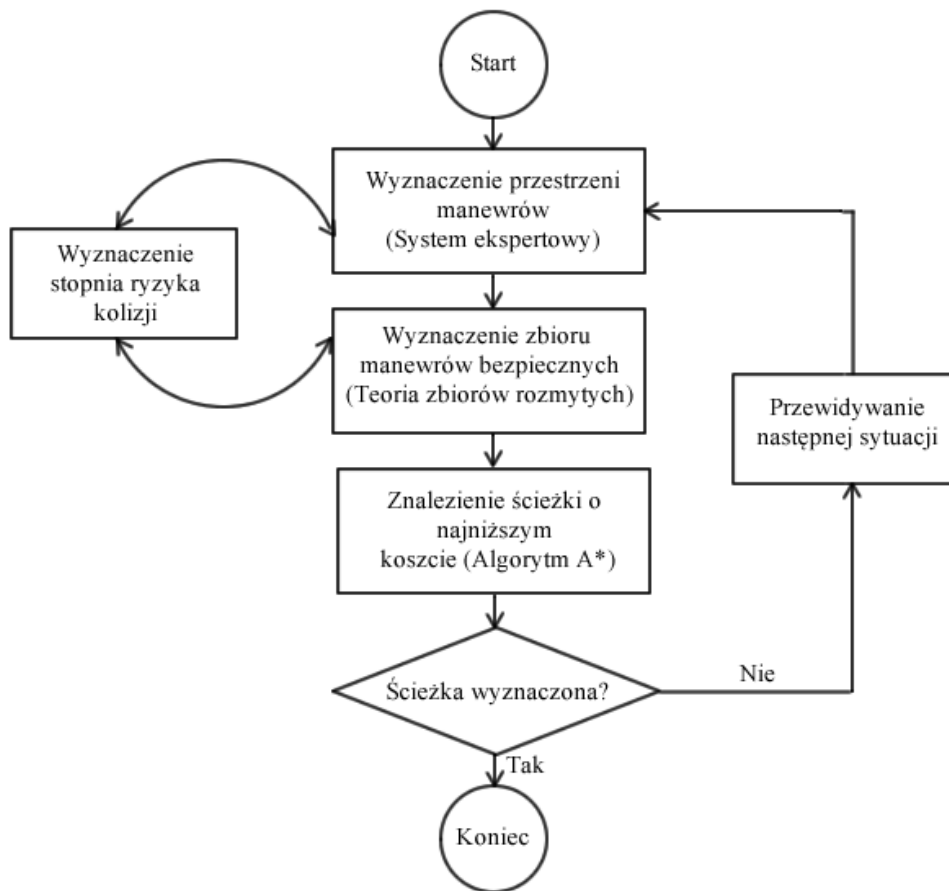
W wypadku braku możliwości rozwiązania danego zadania metodami deterministycznymi, pozytywne efekty można osiągnąć wykorzystując metody heurystyczne. Metody te stanowią jedyną realną możliwość dla wielu złożonych problemów optymalizacyjnych (np. zadań NP-trudnych) (Bovet 1994). Zadaniem metod heurystycznych jest poszukiwanie rozwiązań o dostatecznej jakości w akceptowalnym przedziale czasu. Metody heurystyczne można wykorzystać zarówno pośrednio jak i bezpośrednio w procesie rozwiązywania danego problemu (Russel 2010).

Przykładem tego typu metod zastosowanych w procesie wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść stanowią algorytmy ewolucyjne. Ponieważ opisywana w tej pracy ewolucyjna hierarchiczna metoda wyznaczania ścieżek przejść opiera się na algorytmie ewolucyjnym, przegląd zbliżonych metod będzie przedstawiony w rozdziale 4. Inne metody wykorzystujące heurystykę w procesie poszukiwania ścieżek przejść zaprezentowano poniżej.

3.3.2.1 Metody wykorzystujące teorię zbiorów rozmytych

Teoria zbiorów rozmytych została przedstawiona w pracy (Zadeh 1965). Zbiory te dokonują próby naśladowania sposobu rozumienia i postrzegania ludzi. Zamiast więc wykorzystywać precyzyjną, liczbową informację, używa się danych nieprecyzyjnych, np. „obiekt znajduje się blisko”. Takie podejście do opisu informacji powoduje trudności w implementacji w programach komputerowych. Rozwiązaniem jest tu wprowadzenie funkcji opisującej stopień przynależności elementu do danego zbioru.

Teoria ta znalazła zastosowanie w procesie wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść np. w pracy (Lee 2001). Opisana metoda wykorzystuje parametry CPA i TCPA, które pozwalają ocenić ryzyko zderzenia, które aktywuje moduł unikania kolizji. Rysunek 12 przedstawia schemat blokowy omawianej metody. W kroku pierwszym system ekspertowy wyznacza przestrzeń manewrów bieżącego odcinka trasy (do następnego zaplanowanego punktu zwrotu). Wynikowa przestrzeń (uwzględniająca przepisy COLREG) zostaje w kroku drugim przeszukana celem wyboru manewrów bezpiecznych. W procesie tym stopień zagrożenia kolizją opisany jest z zastosowaniem teorii zbiorów rozmytych. W kroku trzecim system wyznacza najkrótszą ścieżkę, wykorzystując algorytm A* (ang. A*search algorithm). Jeżeli ostatni punkt nie jest końcowym punktem trasy, w punkcie zwrotu proces zostaje powtórzony na odcinku ścieżki do następnego punktu zwrotu.



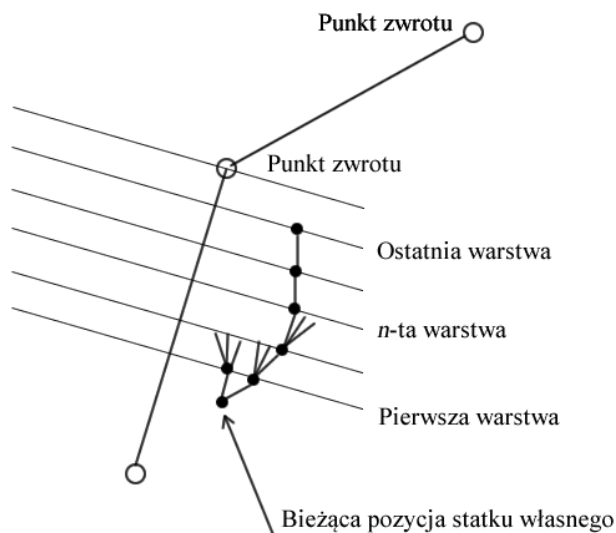
Rysunek 12 – Schemat blokowy działania algorytmu wyznaczania optymalnych ścieżek unikania kolizji wykorzystującego przestrzeń manewrową z zastosowaniem systemu ekspertowego i algorytmu A* (Lee 2001).

Wykorzystany w pracy algorytm A* został opisany w pracy (Dechter 1985). Algorytm ten (rysunek 13) wyznacza optymalną ścieżkę poprzez wyznaczenie kosztów podróży z poniższego równania:

$$C_t = C_{t-wp} + C_{wp-s} \quad 3.1$$

gdzie:

- C_t – całkowity szacowany koszt podróży,
 C_{t-wp} – szacowany koszt podróży od punktu początkowego do bieżącego punktu zwrotu,
 C_{wp-s} – szacowany koszt podróży od bieżącego punktu zwrotu do punktu końcowego.



Rysunek 13 – Wyznaczanie optymalnego manewru uniknięcia kolizji z użyciem algorytmu A* (Lee 2001).

W omawianej metodzie odcinek między obecnym położeniem statku własnego a następnym punktem zwrotu zostaje podzielony na pięć warstw. Między bieżącą pozycją statku własnego a następnym poziomem wyznacza się trzy bezpieczne manewry, które kończą się na linii następnej warstwy. Każda warstwa niezależnie tworzy własną przestrzeń manewrów. Następnie algorytm poszukiwania ocenia wyznaczone odcinki i wybiera najlepszą ścieżkę, która minimalizuje całkowity koszt podróży. Koszt każdego z nich wyznacza się następująco:

$$C_{A-B} = CR * t_{A-B} \quad 3.2$$

gdzie:

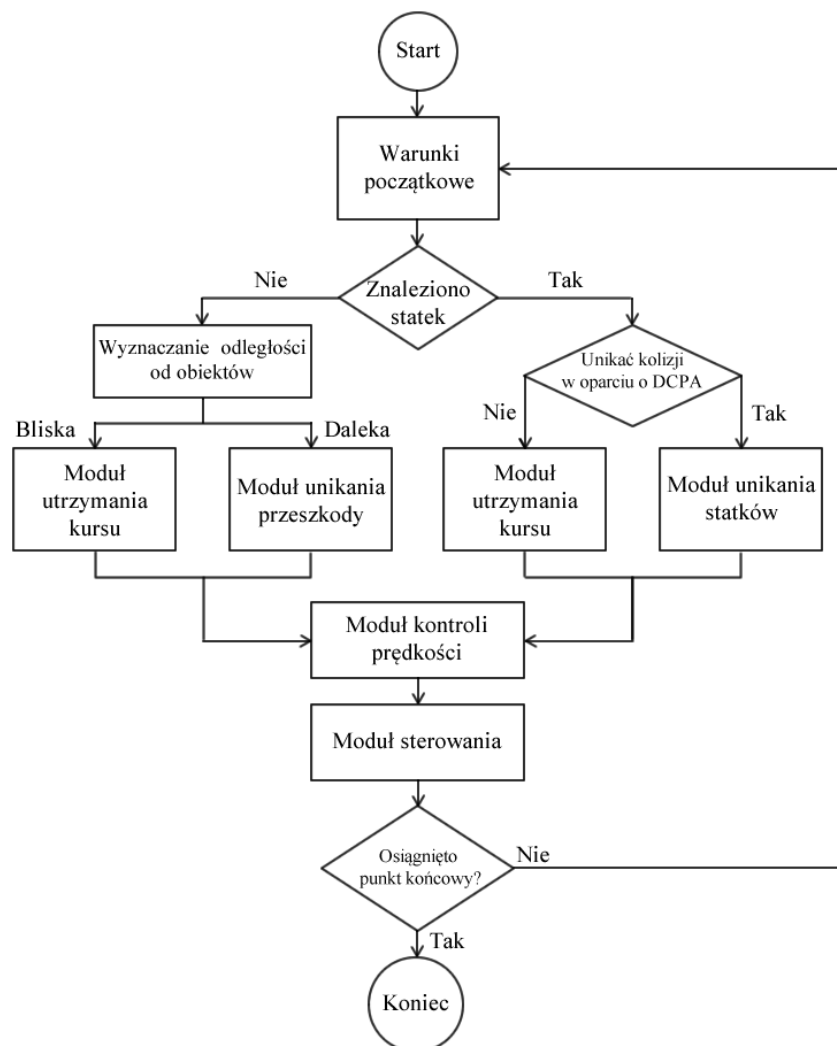
- C_{A-B} – koszt podróży między warstwami,
 CR – ryzyko kolizji,
 t_{A-B} – czas potrzebny do pokonania ścieżki między warstwami.

Proces ten jest kontynuowany w każdej warstwie aż do następnego punktu zwrotu.

W pracach (Hwang 2001, 2002) wykorzystano teorię zbiorów rozmytych do oceny zagrożenia kolizyjnego oraz wyznaczenia bezpiecznych ścieżek przejść. Opisany system składa się z pięciu modułów:

- moduł kontroli prędkości statku własnego,
- moduł określania odległości od przeszkód,
- moduł śledzenia kursu obiektów,
- moduł unikania przeszkód statycznych,
- moduł unikania obiektów.

Każdy z tych modułów działa, wykorzystując teorię zbiorów rozmytych. Kiedy statek własny znajduje się na potencjalnym kursie kolizyjnym z przeszkodą statyczną lub obiektem, ich pozycje względem statku własnego wyznacza się na podstawie danych z radaru. Informacje te służą jako dane wejściowe dla modułu określania odległości od przeszkód. Wyznacza on stopień zbliżenia do obiektów i przeszkód statycznych, który zostaje wykorzystany przez pozostałe moduły. Rozmyty stopień zagrożenia kolizją wzrasta wraz ze zbliżaniem się do przeszkody. Gdy parametr ten osiągnie określoną wartość w którymkolwiek z modułów, moduł ten zostaje uaktywniony w celu przeciwdziałania potencjalnej kolizji. Struktura rozmytego procesu unikania kolizji została przedstawiona na rysunku 14. Kiedy statek własny jest zagrożony zderzeniem z przeszkodą statyczną lub obiektem, system wyznaczy optymalny manewr uniknięcia kolizji, który może zostać przeprowadzony przez operatora lub system autopilota. Wykorzystuje się w tym celu parametr DCPA (ang. Distance at Closest Point of Approach - odległości największego zbliżenia).

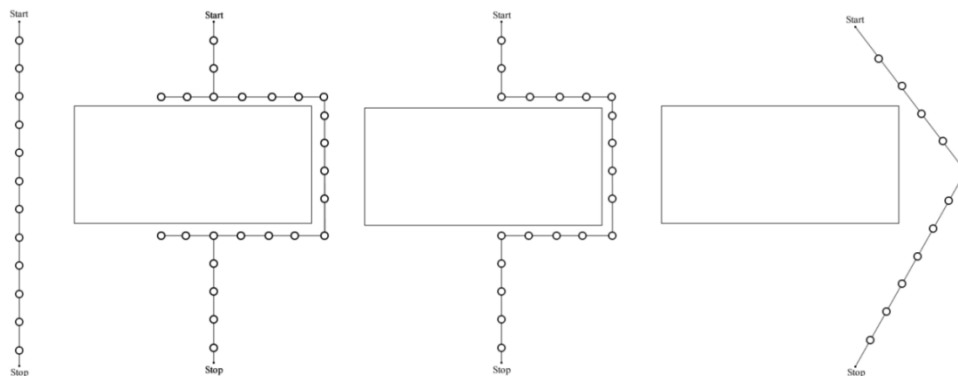


Rysunek 14 – Schemat blokowy rozmytej metody unikania kolizji (Hwang 2001).

W algorytmie sytuacje potencjalnej kolizji z wieloma jednostkami są rozpatrywane jako seria sytuacji zagrożenia zderzeniem z udziałem statku własnego i pojedynczego obiektu. Oznacza to, że wyznaczone ścieżki mogą nie być optymalne oraz bezpieczne.

3.3.2.2 Algorytm mrówkowy

W tej metodzie przy pomocy dedykowanego algorytmu optymalizacja ścieżki przejścia naśladuje zachowanie kolonii mrówek, w której komunikacja odbywa się przy pomocy feromonów (Xiao-Min 2008). Sposób działania metody został przedstawiony na rysunku 15.

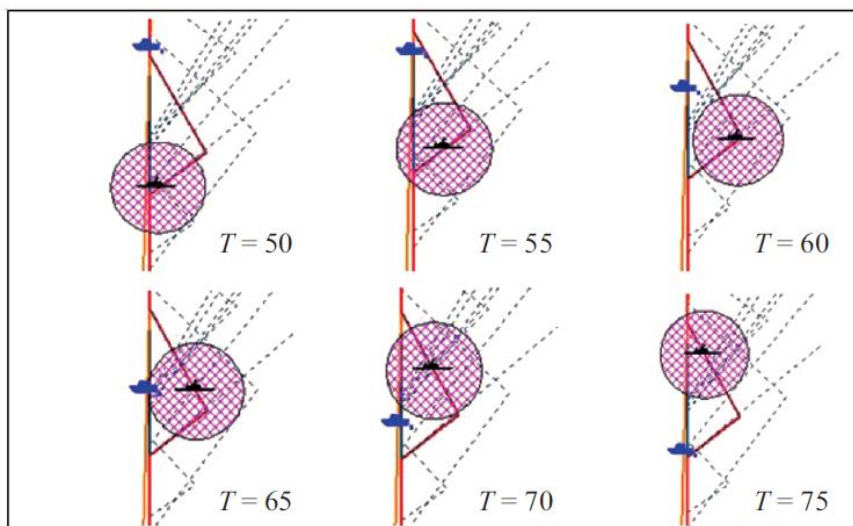


Rysunek 15 – Fazy omijania przeszkody przez kolonię mrówek.

Mrówki poruszają się od punktu start („źródło pożywienia”) do punktu stop („gniazdo mrówek”), gdzie napotykają przeszkodę. Informacja o przebywaniu mrówki w danym punkcie jest przekazywana między osobnikami drogą zapachową przy pomocy feromonów. Inne owady odczytują informację o intensywności zapachu i zostawiają własny feromon. Zachowując się losowo, grupa mrówek poruszających się od startu do stopu wybierze na rozdrożu drogę w lewo, a inna grupa skieruje się w prawo (rysunek 15). Owady, które poruszają się w prawo, mają krótszy dystans do rozdroża w porównaniu z osobnikami, które wybrały lewą stronę, i tym samym szybciej trafią do gniazda. Ich konkurentki po dotarciu do rozdroża znajdują już feromony pozostawione przez pozostałe mrówki. Zapach będzie wzmocniony dodatkowo przez osobniki powracające do gniazda. Jest to wynik działania sprzężenia zwrotnego, które przez wybór krótszej drogi przez większość mrówek czyni ścieżkę dłuższą nieatrakcyjną. Po pewnym czasie wszystkie osobniki będą już podążać nową, najkrótszą drogą. Ta będzie tak długo atrakcyjna, jak długo owady będą się nią poruszać. Jeżeli ścieżka zostanie porzucona, feromony z czasem zanikną.

Z algorytmicznego punktu widzenia przestrzeń poszukiwań najprościej można przedstawić jako graf złożony z wierzchołków oznaczających punkty w środowisku, które połączone są łukami. Symbolizują one możliwe ścieżki.

Metoda ta została wykorzystana w zadaniu wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść w pracy (Ming-Cheng 2010). W artykule proponuje się system oparty o koncepcję e-nawigacji zatwierdzoną przez IMO w 2005 roku (Patraiko 2010). Autorzy przedstawiają metodę integracji algorytmu kolonii mrówek do współczesnych systemów nawigacyjnych. Jako źródło danych zaproponowano system AIS. Przeprowadzone badania porównawcze z algorytmem ewolucyjnym wykazały, że algorytm mrówkowy wyznaczał krótsze i bardziej ekonomiczne rozwiązania w czasie zbliżonym do czasu obliczeń algorytmu ewolucyjnego. Wadą przedstawionej metody jest kształt wynikowych ścieżek przejść w sytuacjach kolizyjnych. Wyznaczone manewry wiążą się ze zmianą kursu o znaczny kąt, co może być niezgodne z praktyką morską lub wręcz niemożliwe do wykonania w przypadku mniej zwrotnych jednostek. Przykład ścieżek przejść wyznaczonych opisaną metodą przedstawiono na rysunku 16.



Rysunek 16 – Unikanie kolizji z wykorzystaniem algorytmu mrówkowego (Ming-Cheng 2010).

Wyznaczaniem ścieżek przejść przy pomocy algorytmów mrówkowych zajmują się również od niedawna badacze z Akademii Morskiej w Gdyni (Lazarowska 2013). W swojej dotychczasowej pracy przedstawili oni pierwsze symulacje opracowanego algorytmu oraz koncepcję włączenia go do urządzenia ARPA.

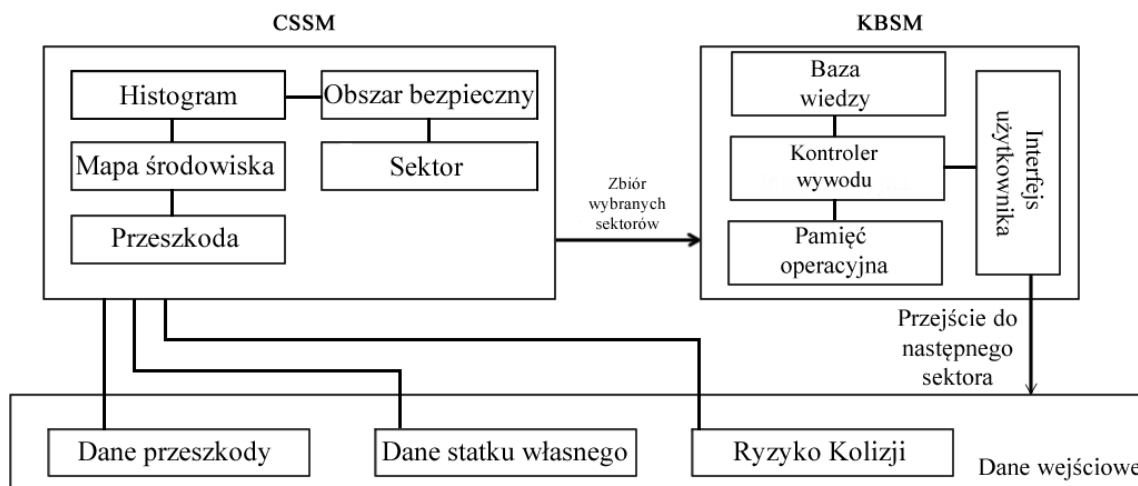
3.3.2.3 Metody wykorzystujące systemy ekspertowe

Podczas badań nad współczesnym inteligentnym statkiem w pracy (Iijima 1991) opracowano system ekspertowy wykorzystywany w procesie wyznaczania ścieżek przejść. Zaprojektowano go w sposób pozwalający na niezależne przeprowadzenie zoptymalizowanego manewru antykolizyjnego z uwzględnieniem jego oceny. Wybór i planowanie bezkolizyjnych ścieżek przejść odbywa się metodą przeszukiwania wszerz (ang. breadth-first search) z zastosowaniem następujących parametrów:

- długości ścieżki,
- kąta zmiany kursu,
- zagrożenia kolizją,
- zgodności z przepisami COLREG z wykorzystaniem systemu ekspertowego.

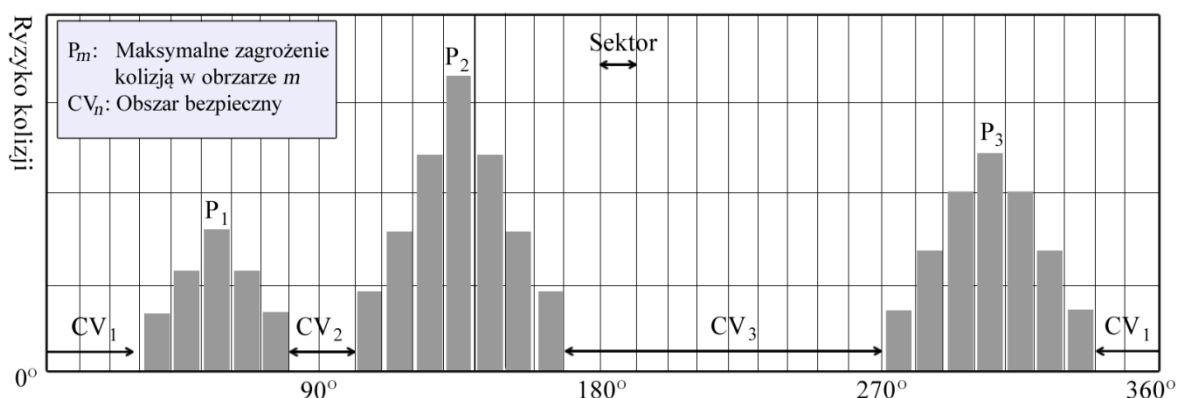
Ścieżka jest aktualizowana co 10 sekund. Program analizuje obiekty w kolejności nadanego priorytetu z założeniem, że śledzone jednostki nie będą modyfikować kursu.

W pracy (Lee 2004) zaprezentowano system unikania kolizji dla zautomatyzowanego statku. Wykorzystuje się w nim system ekspertowy, który w momencie wykrycia przeszkody ma na celu wyznaczenie optymalnej i bezpiecznej ścieżki uwzględniającej przepisy COLREG. System podzielony jest na dwa główne moduły: CSSM (ang. Candidate Sector set Selection Module – moduł wyboru zbioru obszaru bezpiecznego) oraz KBSM (ang. Knowledge-Based System Module – moduł systemu ekspertowego). Struktura ta została przedstawiona na rysunku 17. CSSM ma zadanie określić obszar, w którym poszukiwać się będzie bezpiecznych ścieżek przejść, natomiast KBSM wyznacza te ścieżki.



Rysunek 17 – Schemat systemu unikania kolizji (Lee 2004).

Żeby tego dokonać, wokół statku własnego wyznacza się sektory ryzyka kolizji, które następnie zostają naniesione na histogram (rysunek 18). Każdy sektor wykresu poniżej określonej wartości staje się obszarem bezpiecznym, czyli rejonem gdzie ryzyko kolizji nie istnieje lub jest akceptowalne. System znajduje i wybiera takie sektory wykresu, które spełniają założone kryteria optymalizacji i bezpieczeństwa. Ocena przeprowadzana jest na podstawie rozmytego wyniku względnego (ang. fuzzy relational product). Następnie system ekspertowy weryfikuje zgodność wybranego sektora z prawidłami COLREG. Rozwiązywanie sytuacji kolizyjnych z wieloma obiektami rozdziela się na serię zdarzeń z pojedynczym obiektem identycznie jak w przypadku opisanej wcześniej pracy (Hwang 2002).



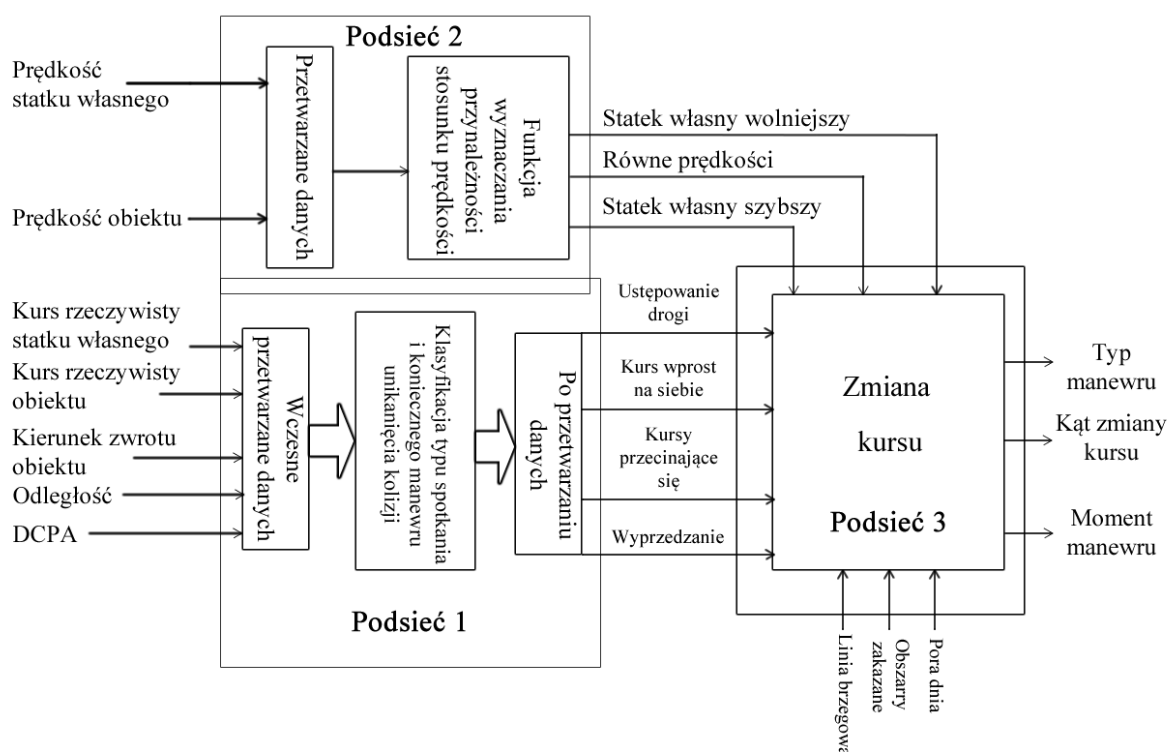
Rysunek 18 – Histogram sektorów zagrożenia kolizją wokół statków reprezentujący ryzyko kolizji. Na wykresie oznaczono obszary bezpieczne CV (ang. Candidate Valley) (Lee 2004).

3.3.2.4 Metoda wykorzystująca sieci neuronowe

W pracy (Liu 2005) przedstawiono metodę wyznaczania bezpiecznych ścieżek z zastosowaniem zbiorów rozmytych oraz sieci neuronowych. Ogólna struktura opisywanego algorytmu opiera się na trzech podsieciach sieci neuronowej, a każda z tych podsieci monitoruje inne parametry:

- typ sytuacji kolizyjnej – wyznaczany na podstawie parametru DCPA, kursu rzeczywistego, odległości oraz kierunku zwrotu obiektu (podsieć 1),
- stosunek prędkości – rozmyty stosunek prędkości pomiędzy statkiem własnym a obiektem opisany przy pomocy wiadomości np. „statek własny wolniejszy”, „równe prędkości”, „statek własny szybszy” (podsieć 2),
- wynikową zmianę kursu – wyznaczony manewr uniknięcia kolizji. Wynik zostaje podany w postaci rozmytej (podsieć 3).

Struktura tak zbudowanej sieci została przedstawiona na rysunku 19. Dane wejściowe podsieci 1 i 2 pochodzą od operatora i danych zgromadzonych ze statkowych systemów nawigacji. Podsieć 3 wyznacza manewr unikania kolizji wykorzystując dane z pozostałych podsieci. Struktura każdej z nich jest niezależna i posiada własne algorytmy uczenia się.



Rysunek 19 – Struktura interfejsu wyznaczania manewru unikania kolizji opartego na teorii zbiorów rozmytych oraz sieci neuronowych.

Algorytm wyznacza manewr, który pozwala uniknąć kolizji jedynie z obiektem reprezentującym najwyższe ryzyko zderzenia. Ignoruje jednocześnie potencjalne kolizje z pozostałymi statkami. Metoda nie gwarantuje więc, że wyznaczone ścieżki będą bezpieczne.

3.4 Podsumowanie

W rozdziale przeprowadzono analizę metod wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść w środowisku morskim. Podzielono je na metody deterministyczne i heurystyczne. Dokonano również analizy prac zajmujących się poszukiwaniem manewru uniknięcia kolizji. Na podstawie przeglądu wybranych prac można przyjąć następujące wnioski:

- nie istnieje uniwersalna metoda, która w sposób wyczerpujący spełniałaby wymagania stawiane zadaniu poszukiwania i optymalizowania bezpiecznych ścieżek przejść na morzu,
- część opisywanych prac uwzględnia przepisy COLREG. Warto jednak zauważyć, że metody te wyznaczają rozwiązanie dla sytuacji kolizyjnych dwóch statków. W przypadku wystąpienia zagrożenia ze strony większej liczby jednostek, sytuacje kolizyjne rozpatrywane są jako zbiory kilku potencjalnych zagrożeń z udziałem pary statków. Ścieżki wyznaczone w taki sposób mogą być niekorzystne lub też nie gwarantować bezpieczeństwa.
- część metod poddanych analizie nie może zostać wykorzystana w warunkach rzeczywistych ze względu na ignorowanie przepisów COLREG,
- różnorodność i zawodność prezentowanych metod potwierdza złożoność rozwiązywanego zadania.

W dalszej części pracy opisana zostanie metoda ewolucyjna, którą wykorzystano w algorytmie hEP/N.

4 Algorytmy ewolucyjne

W rozdziale 4 zaprezentowano algorytmy ewolucyjne, ich zalety, sposób działania oraz modyfikacje wykorzystane w algorytmie hEP/N. Rozdział zamknięto przeglądem ewolucyjnych metod wyznaczania ścieżek przejść na morzu.

4.1 Wstęp

Algorytmy ewolucyjne stanowią metodę optymalizacji stochastycznej opartą na ewolucyjnych mechanizmach doboru naturalnego i dziedziczności. Naśladują one analogiczne procesy zachodzące w świecie biologicznym (Goldberg 2005; Michalewicz 1996). Łączenie ewolucyjnej zasady przeżycia najlepiej przystosowanych osobników z systematyczną, choć losową, wymianą informacji pozwala otrzymać skuteczną metodę uzyskiwania rozwiązań (Cormen 2001). W metodzie tej terminy biologiczne zostały przeniesione na grunt algorytmiczny, gdzie zbiór rozwiązań, pomiędzy którymi dochodzi do wymiany i rekombinacji danych, nazywany jest populacją osobników. Każdy z nich ma przypisany pewien zbiór informacji stanowiących jego genotyp, a będących podstawą do wyznaczenia fenotypu. Fenotyp to zbiór cech danego osobnika, które podlegają ocenie przez funkcję przystosowania. Funkcja ta przypisuje osobnikowi wartość przystosowania, która określa jakość reprezentowanego przez niego rozwiązania (Arabas 2004). Genotyp osobnika składa się z chromosomów, które zawierają kod określający fenotyp oraz informacje pomocnicze dla algorytmu ewolucyjnego. Informacje te mogą nie mieć bezpośredniego wpływu na wartość przystosowania osobnika. Chromosom złożony jest z genów, czyli elementarnych części składowych rozwiązania rozpatrywanego problemu. Z każdym krokiem działania algorytmu zbiór rozwiązań, na skutek wymiany informacji, będzie się zmieniać. Populację pojedynczego kroku nazywać się będzie pokoleniem.

Taka struktura pozwala wykorzystać metodę ewolucyjną do rozwiązywania zadań optymalizacyjnych. Polega to na przeszukiwaniu przestrzeni potencjalnych rozwiązań, które umożliwia znalezienie tego optymalnego.

4.2 Optymalizacja a algorytmy ewolucyjne

Problem optymalizacji może być zapisany jako poszukiwanie wartości zmiennej x w zadanym zbiorze Z , dla której funkcja f przyjmuje optymalną wartość. Funkcja ta, w algorytmach ewolucyjnych zwana funkcją przystosowania, jest miarą jakości, jaką mierzy się dane rozwiązanie (Goldberg 1995). Celem może tu być minimalizacja czasu podróży lub też długości trasy. Zbiór Z wyznaczony jest tutaj jako zbiór ograniczeń, takich jak np. pozycja przeszkody dynamicznej.

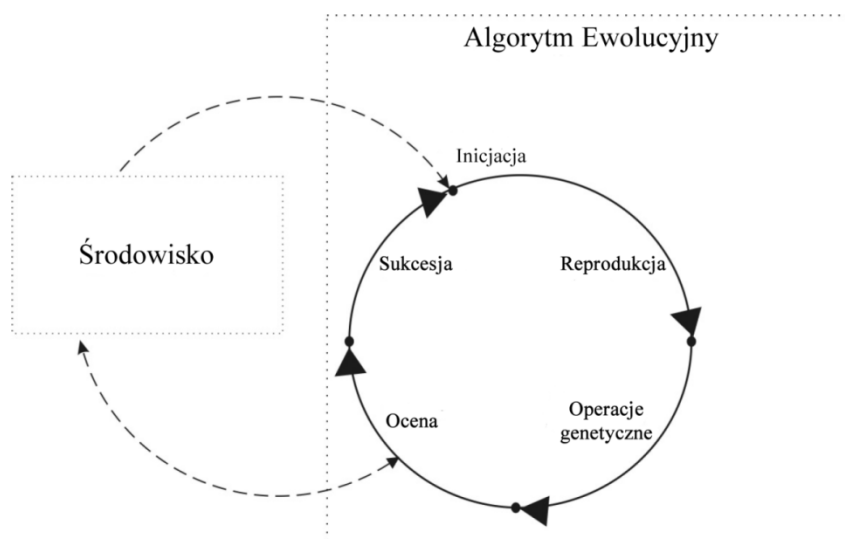
Większość klasycznych algorytmów optymalizacyjnych stosuje deterministyczną procedurę, w której etapami dochodzi się do optymalnego rozwiązania. Algorytmy te muszą przeszukać całą przestrzeń rozwiązań, zanim zostanie wyznaczone optymalne rozwiązanie. Może to skutkować długim czasem obliczeń. Na ich tle metoda ewolucyjna posiada następujące zalety (Branke 2012; Goldberg 2005) :

- algorytmy ewolucyjne stosują probabilistyczne, a nie deterministyczne reguły wyboru, pozwalając na znaczne ograniczenie czasu obliczeń (Goldberg 1995),
- optymalizacja opiera się tylko na funkcji celu, nie zaś jej pochodnych lub innych pomocniczych informacji (Goldberg 1995),
- algorytmy ewolucyjne prowadzą poszukiwania wychodząc nie z jednego punktu, lecz z pewnej ich populacji (Goldberg 1995),
- jest to metoda uniwersalna, którą można stosować w szeregu różnych zadań (Branke 2012),
- algorytmy ewolucyjne pozwalają na uzyskanie rozwiązania w czasie zbliżonym do rzeczywistego dla zadań cechujących się dynamicznymi zmianami parametrów (Branke 2012),

Wśród wad algorytmów ewolucyjnych należy wymienić brak gwarancji otrzymania rozwiązania optymalnego globalnego. Problem stanowić może również konieczność doboru optymalnych parametrów algorytmu ewolucyjnego, które pozwolą na znalezienie rozwiązania o wymaganej jakości (Branke 2012).

4.3 Schemat funkcjonowania algorytmów ewolucyjnych

Działania klasycznego algorytmu ewolucyjnego sprowadza się do wykonywania pętli przedstawionej na rysunku 20.



Rysunek 20 – Schemat działania klasycznych algorytmów ewolucyjnych (Arabas 2004).

Działanie klasycznego algorytmu ewolucyjnego składa się z następujących kroków (Arabas 2004):

- Inicjacja – w pierwszym kroku zostaje wyznaczona początkowa populacja bazowa. Jest to zbiór losowych, rozwiązań optymalizowanego problemu.
- Reprodukcja – w kolejnym kroku modeluje się rozmnażanie, podczas którego materiał genetyczny rodziców jest przekazywany potomkom. Podczas reprodukcji powiela się losowe osobniki z populacji. Dany osobnik może być powielony wielokrotnie. Losowość wyboru do reprodukcji uwzględnia jednak wartość przystosowania danego osobnika. Osobniki o wyższej wartości przystosowania mają większe szanse powielenia. Istnieje wiele modeli selekcji rodziców, które zostały przedstawione w dalszej części rozdziału 4.
- Operacje genetyczne – w tym kroku powstałe w wyniku reprodukcji kopie, zwane rodzicami, poddawane są operacjom genetycznym. Polegają one na dokonaniu modyfikacji ich genotypów. Wśród operacji genetycznych wyróżnia się operację mutacji i krzyżowania. Mutacja polega na losowej zmianie jednego lub wielu genów danego osobnika. Z kolei krzyżowanie jest to operator działający na co najmniej dwóch rodzicach, który prowadzi do wygenerowania jednego lub wielu potomków. Ich chromosomy powstają w wyniku łączenia odpowiednich chromosomów pochodzących od rodziców. Osobniki utworzone w wyniku w wyniku działania operatorów genetycznych stanowią populację potomną.
- Ocena – w kolejnym kroku osobnikom populacji potomnej zostaje wyznaczona ich wartość przystosowania.
- Sukcesja – w tym kroku tworzona jest nowa populacja bazowa, w której mogą się znaleźć osobniki zarówno z populacji potomnej jak i z poprzedniej populacji bazowej. W literaturze najczęściej wykorzystuje się algorytmy, w których liczba członków populacji jest stała (algorytmy Steady State). Algorytmy te pozwalają osiągnąć rozwiązania lepsze w porównaniu do algorytmów, w których populacja zwiększa się z każdą sukcesją.

f) Zakończenie algorytmu – algorytm ewolucyjny kończy obliczenia w przypadku spełnienia jednego z poniższych kryteriów (Arabas 2004):

- kryterium maksymalnego kosztu – przyjmuje się, że jeżeli koszt algorytmu przekroczy określoną wartość maksymalną K_{max} , to algorytm kończy działanie. Wartość K_{max} wynika najczęściej ze specyfiki rozwiązywanego problemu. Przez koszt algorytmu należy rozumieć wybrany parametr opisujący jego działanie np. liczbę generacji,
- kryterium określonego poziomu przystosowania – kryterium to jest spełnione, jeśli algorytm znajdzie rozwiązanie o wymaganej wartości przystosowania określonej przez użytkownika, czyli gdy zachodzi:

$$\Phi(\hat{X}(t)) \geq \Phi_s \quad 4.1$$

gdzie Φ_s jest określonym poziomem wartości przystosowania, a $\hat{X}(t)$ – najlepszym znalezionym osobnikiem,

- kryterium minimalnej szybkości poprawy – kryterium to bazuje na obserwacji szybkości zmian wyniku osiągniętego przez algorytm ewolucyjny. Jego parametrami są wartości τ i ε . Algorytm jest zatrzymany, jeżeli w kolejnych τ generacjach nie uda się poprawić wyniku o więcej niż ε , czyli jeżeli jest spełniony warunek:

$$|\Phi(\hat{X}(t - \tau)) - \Phi(\hat{X}(t))| \leq \varepsilon \quad 4.2$$

Często przyjmowane jest $\varepsilon = 0$. W takim wypadku algorytm zatrzymuje się, jeśli w kolejnych τ generacjach nie uzyskano lepszego rozwiązania.

Dodatkowo działanie algorytmu ewolucyjnego można podzielić na dwie fazy (Arabas 2004):

- a) fazę eksploracji – w której następują jak najszerze przeszukiwanie środowiska w celu poszukiwania obszaru maksimum globalnego. Wyznaczenie tego obszaru oznacza przejście do kolejnej fazy,
- b) fazę eksploatacji – na tym etapie algorytm wybrał już jedną lub więcej nisz, którą przeszukuje w celu dalszej optymalizacji. Pozwala to odnaleźć rozwiązanie końcowe równe lub bliskie optymalnemu.

W pracy (Arabas 2004) fazy te zdefiniowano następująco:

„Wyobraźmy sobie dziedzinę funkcji przystosowania – Zbiór wszystkich chromosomów G . Oznaczmy maksimum lokalne tej funkcji przez \hat{X} . Załóżmy, że dla rozwiązywanego problemu maksymalizacji funkcji przystosowania dysponujemy pewnym idealnym algorytmem, dzielącym dziedzinę funkcji przystosowania na rodzinę wzajemnie rozłącznych zbiorów przyciągania maksimumów lokalnych $G(\hat{X})$.

*Przez **eksploatację** można rozumieć przeszukiwanie obszaru przyciągania $G(\hat{X})$ w celu wyznaczenia maksimum lokalnego \hat{X} . Jest to zatem zadanie optymalizacji lokalnej. Zarówno w przypadku zadań ciągłych, jak i dyskretnych, znane są liczne efektywne metody i istnieje dobrze*

ugruntowana teoria. Natomiast eksploracja polega wybraniu zbioru $G(X)$ zawierającego maksimum globalne X , z rodziny obszarów przyciągania ekstremów.”

Warto podkreślić konieczność zachowania równowagi pomiędzy obiema fazami. Proces sterowania tą równowagą nazywany jest naciskiem selektywnym i ma on znaczący wpływ na działanie algorytmu ewolucyjnego. Długi czas trwania fazy eksploracji oznaczać będzie, że algorytm nie zatrzymuje się w obszarze przyciągania maksimum globalnego i traci możliwość wejścia w fazę eksploatacji. Również szybkie osiągnięcie zbieżności nie jest korzystne, gdyż algorytm może zatrzymać się w maksimum lokalnym, pomijając obszar przyciągania maksimum globalnego (Arabas 2004).

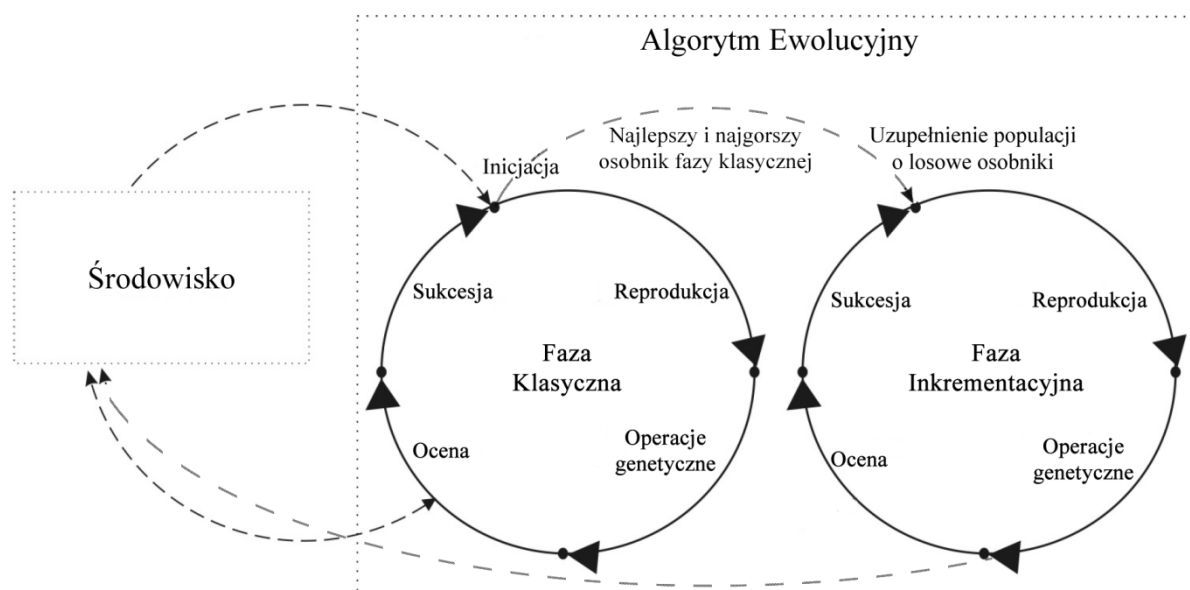
4.4 Modyfikacje algorytmów ewolucyjnych

4.4.1 Inkrementacyjny algorytm ewolucyjny

Algorytm ten został zaproponowany w pracy (Noever 1992). Stanowi rozwinięcie klasycznego algorytmu ewolucyjnego i składa się z dwóch faz:

- fazy klasycznej, w której rozwiązania wyznaczone są przez klasyczny algorytm ewolucyjny.
- fazy inkrementacyjnej, w której algorytm ewolucyjny rozpoczyna poszukiwanie rozwiązań z wykorzystaniem populacji początkowej zawierającej najlepszego i najgorszego osobnika z populacji końcowej fazy klasycznej, uzupełnionej o losowe osobniki. Populacja początkowa fazy inkrementacyjnej zawiera identyczną liczbę osobników co populacja początkowa fazy klasycznej.

Takie podejście pozwala zredukować czas obliczeń w przypadku modyfikacji zadanego problemu. Jest to szczególnie korzystne dla skomplikowanych zadań o długim czasie obliczeń. Schemat działania takiego algorytmu przedstawiono na rysunku 21.



Rysunek 21 – Schemat działania inkrementacyjnego algorytmu ewolucyjnego (Noever 1992).

4.4.2 Wielopopulacyjny algorytm ewolucyjny

Rozproszone, wielopopulacyjne algorytmy ewolucyjne opierają się na równoległym działaniu klasycznej jego wersji. Wyznaczone w sposób losowy osobniki są przydzielane do różnych populacji. Następnie obliczenia przebiegają równolegle w obrębie każdej z nich. By zachować różnorodność populacji dochodzi do wymiany osobników między populacjami w sposób synchroniczny lub asynchroniczny (Suh 1987).

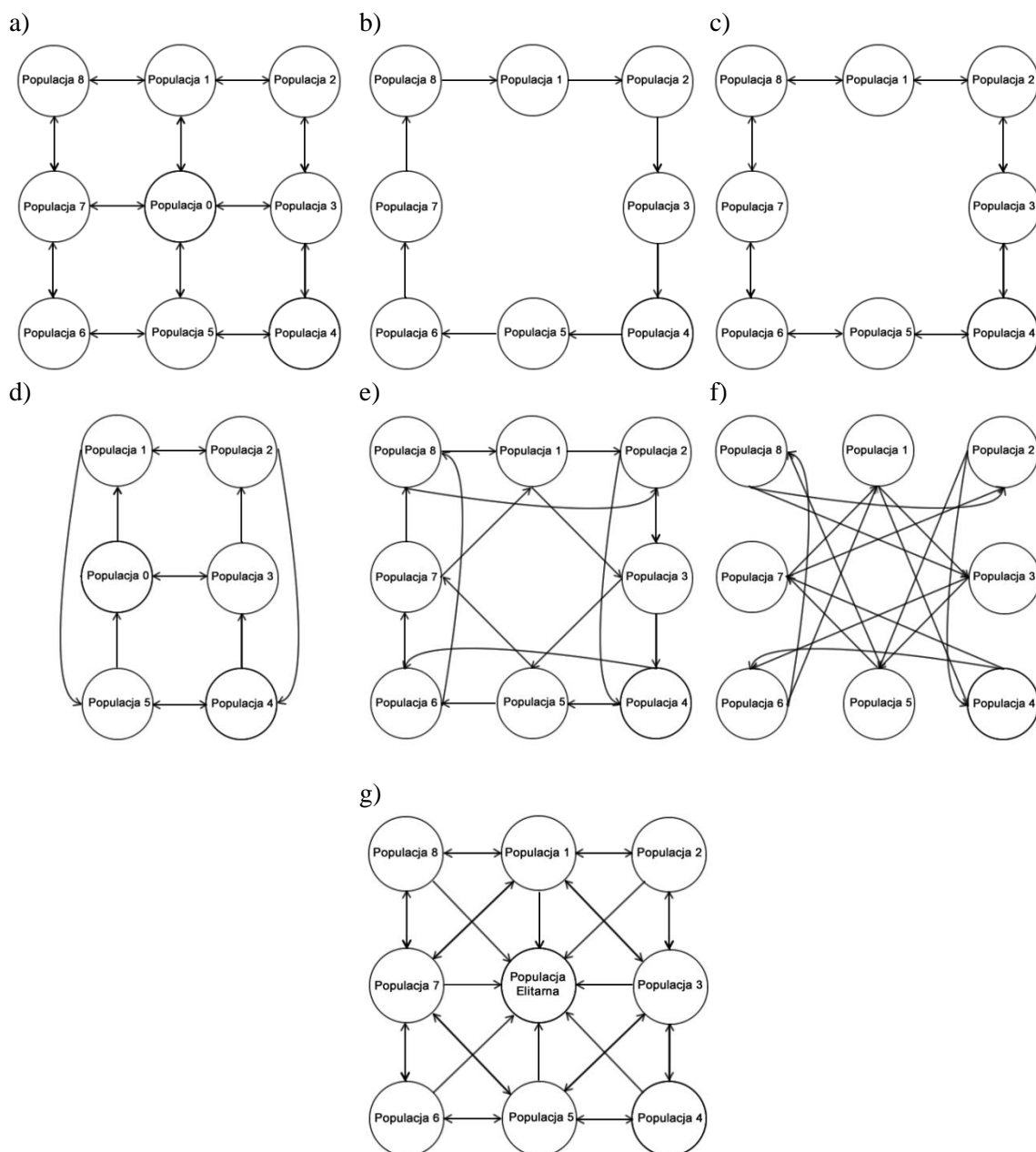
Pierwsze równoległe implementacje algorytmów ewolucyjnych powstały w latach osiemdziesiątych. Były jednak bardzo podobne do klasycznej wersji metody. Służyły one jedynie przyspieszeniu obliczeń poprzez użycie kilku komputerów i systemu współdzielenia pamięci. Zaczęto jednak zauważać, że pewne równoległe implementacje mogą doprowadzić do zmniejszenia ilości

obliczeń i pozwalają na szybsze osiągnięcie lepszych wyników. Przełomowa okazała się praca (Tenese 1987), gdzie wprowadzono model migracji. Późniejsze prace (Wang 1998) wykazały, że wielopopulacyjny algorytm ewolucyjny wykorzystujący ten model wyznacza rozwiązania lepsze niż klasyczna jego wersja.

Algorytmy wielopopulacyjne cechują się rozszerzoną możliwością modyfikacji ze względu na dodatkową warstwę migracji. W pracy (Denzinger 2003) zaproponowano wykorzystanie wielu populacji, co nie tylko pozwala osiągnąć korzystną wartość przystosowania, ale także podtrzymać różnorodności osobników. W pracy (Borovska 2007) uzyskano lepsze rozwiązania, gdy w procesie migracji uczestniczyły osobniki najlepsze, a nie losowe.

Wyróżnia się kilka rodzajów topologii migracji (rysunek 22):

- a) wymiana osobników między wszystkimi populacjami,
- b) osobniki migrują tylko do sąsiedniej populacji w jedną stronę, tworząc zamknięty okrąg – okrąg jednokierunkowy,
- c) migracja osobników odbywa się tylko pomiędzy sąsiednimi populacjami w obie strony – okrąg dwukierunkowy,
- d) w kolejnej strategii struktura populacji tworzy kilka poziomów. Migracja odbywa się na poszczególnych poziomach w obie strony, ale migracja osobników na wyższy poziom zachodzi tylko w kierunku wyższego poziomu. Dodatkowo osobniki z najniższego poziomu mogą migrować (w jedną stronę) na najwyższy poziom – drabina,
- e) osobniki tworzą okrąg i migrują w jednym kierunku do dwóch najbliższych populacji – okrąg 1+2,
- f) osobniki tworzą okrąg i migrują w jednym kierunku do dwóch najbliższych populacji w jednym kierunku z pominięciem najbliższej sąsiedniej populacji – okrąg 2+3,
- g) wszystkie populacje podległe swobodnie wymieniają osobników pomiędzy sobą, a najlepsze zostają wysyłane do populacji elitarniej – topologia populacji elitarniej.



Rysunek 22 – Różne topologie migracji: a) Topologia wymiany osobników między wszystkimi populacjami (rysunek uproszczony), b) Okrąg jednokierunkowy, c) Okrąg dwukierunkowy, d) Drabina, e) Okrąg 1+2 f) Okrąg 2+3, g) Topologia populacji elitarniej.

4.4.3 Skalowanie funkcji przystosowania

Skalowanie funkcji przystosowania polega na modyfikacji wartości przystosowania osobników populacji w trakcie ich oceny (Arabas 2004). Pozwala to na zwiększenie różnorodności populacji krótko po uruchomieniu algorytmu ewolucyjnego (co zapobiega przedwczesnej zbieżności algorytmu) lub upraszcza znalezienie rozwiązania bliżej końca jego działania. Wykorzystanie skalowania zapobiega również sytuacji, w której osobniki populacji otrzymują nadmiernie zbliżone wartości przystosowania. Wśród wykorzystywanych sposobów skalowania należy wymienić (Arabas 2004; Hopgood 2009; Maza 1991; Michalewicz 1996; Sadjadi 2004):

- a) skalowanie liniowe, które polega na wyznaczeniu zmodyfikowanej funkcji przystosowania f' przy użyciu przekształcenia liniowego opisanego za pomocą wzoru:

$$f' = af + b \quad 3.3$$

gdzie parametry a i b są dobrane tak, aby spełnić dwa warunki:

- brak zmiany średniej wartości przystosowania,
- wartość przystosowania stanowi wielokrotność jej średniej.

Jeżeli powyższe warunki są spełnione, przeciętny osobnik tworzy średnio jednego potomka w następnej generacji, a osobnik o najwyższej wartości przystosowania liczbę potomków określoną wielokrotnością wynikającą ze średniej wartości tego parametru. Metoda ta jest skuteczna, gdy w populacji nie występują osobniki o ujemnej wartości przystosowania. Skalowanie liniowe jest parametryzowane wartościami a i b , które zależą nie od analizowanego problemu, ale od charakterystyki populacji,

- b) skalowanie odcinające typu sigma, gdzie od wartości przystosowania odejmuje się stałą, której wartość zależy od odchylenia standardowego σ funkcji przystosowania f . Jej przekształcenie do postaci f' dokonuje się według następującej zależności:

$$f' = f - (\bar{f} - c\sigma) \quad 3.4$$

Stałą c dobiera się z zakresu pomiędzy 1 a 3. Wszystkie wartości ujemne ($f' < 0$) zostają automatycznie zamienione na 0. Tym sposobem metoda ta może funkcjonować w populacjach z osobnikami o ujemnej wartości funkcji przystosowania. Implementacja metody polega zazwyczaj na uruchomieniu skalowania odcinającego typu sigma, które następnie zostaje zastąpione przez skalowanie liniowe,

- c) skalowanie potęgowe, gdzie wartość przystosowania zostaje podniesiona do określonej potęgi. Przekształcenie funkcji przystosowania f do postaci f' dokonuje się według poniższego wzoru:

$$f' = f^k \quad 3.5$$

Wartość k zależna jest od analizowanego problemu. Zmiana wartości tego parametru może być wymagana podczas działania algorytmu ewolucyjnego w celu zmiany nacisku selektywnego. Zaobserwowano, że skalowanie to w znaczący sposób poprawia jakość rozwiązania w przypadku problemu ewolucyjnego wyznaczania ścieżek przejść (Kolendo 2014),

- d) skalowanie rankingowe obejmuje klasyfikowanie wszystkich osobników według pierwotnej wartości przystosowania. Nowa wartość uwzględnia ich rangę przy użyciu poniższego wzoru:

$$f_{rounded} = p - 2 \frac{(r-1)(p-1)}{n-1} \quad 3.6$$

gdzie r jest rangą osobnika, p – zadany naciskiem selektywnym, a n – rozmiarem populacji,

- e) Skalowanie eksponencjalne wymaga wyznaczenia rangi każdego osobnika, a przeskalowanie wartości przystosowania wyznacza się przy użyciu następującego wzoru:

$$f_{exponential} = m^{(r-1)} \quad 3.7$$

Nowy wynik opisujący przystosowanie każdego osobnika jest m razy większy od wartości oryginalnej. Niska wartość parametru m może wpływać na wysoką wartość nacisku selektywnego.

4.4.4 Metody Selekcji

Wyróżnia się kilka głównych metod selekcji, dzięki którym można modyfikować stopień różnorodności populacji i związany z nim nacisk selektywny:

- a) selekcja ruletkowa – podstawowa metoda wykorzystywana w algorytmach ewolucyjnych. Prawdopodobieństwo wyboru danego osobnika do procesu krzyżowania jest proporcjonalne do wartości jego przystosowania (Alabsi 2012). Słabsze osobniki wciąż biorą udział w poszukiwaniu rozwiązań, gdyż część ich chromosomu może stanowić bazę przyszłego optymalnego rozwiązania. Stosując skalowanie opisane w poprzednim podrozdziale, można dodatkowo zwiększać prawdopodobieństwo wyboru danego osobnika poprzez manipulację wartością jego przystosowania. Gdy zostanie wyznaczone prawdopodobieństwo wyboru dla każdego rozwiązania, następuje losowa selekcja osobnika do krzyżowania poprzez losowanie liczby z przedziału stanowiącego sumę przystosowań wszystkich rozwiązań. Każdy osobnik zajmuje przestrzeń omawianego przedziału proporcjonalną do wartości swego przystosowania. Losowanie jest powtarzane aż do wypełnienia puli rodzicielskiej,
- b) selekcja rankingowa – w przypadku tej selekcji prawdopodobieństwo wyboru danego rozwiązania do procesu krzyżowania jest proporcjonalne do jego rangi (Ghandi 2012):

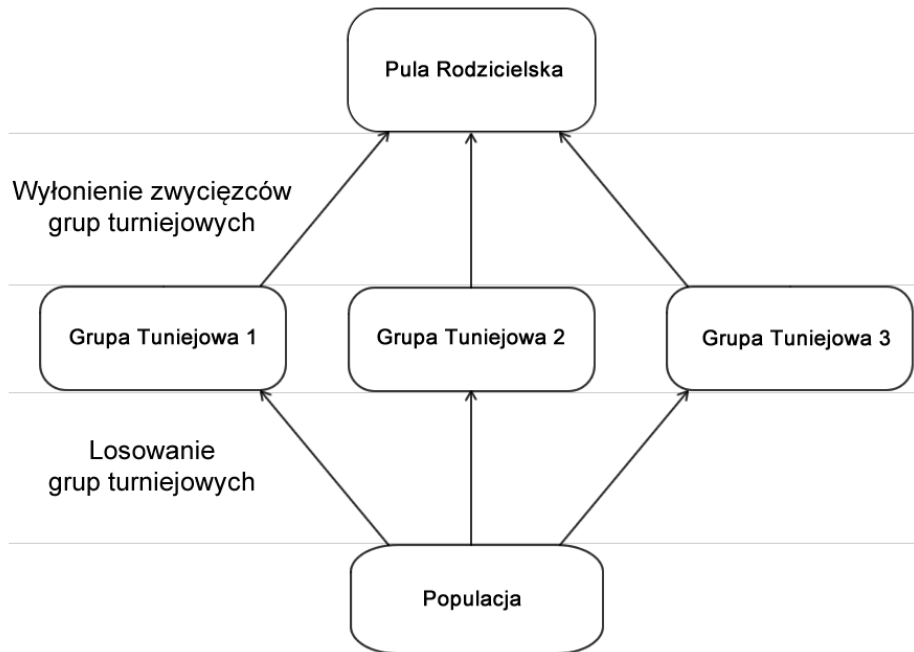
$$S_i = \frac{i_{rank}}{\Sigma P} \quad 3.8$$

gdzie P to suma rang wszystkich osobników.

Losowanie odbywa się podobnie jak w przypadku selekcji ruletkowej, a różnica polega na innym rozłożeniu prawdopodobieństwa. W tym wypadku trudniej jest o dominację jednego osobnika w populacji. Daje to słabszym osobnikom realną szansę wzięcia udziału w krzyżowaniu. Takie podejście to liniowa selekcja rankingowa. Selekcję rankingową można rozszerzyć o ideę elityzmu. Aby zachować jak najlepsze geny, selekcja nie następuje w drodze losowania, lecz osobniki parowane są ze swoimi sąsiadami. W ten sposób osobnik najlepszy będzie sparowany z osobnikiem drugim, trzeci z czwartym itd.,

- c) selekcja turniejowa – metoda ta różni się od wcześniej opisanych i polega na losowym doborze kilku osobników z populacji do tzw. grupy turniejowej. Następnie z grupy tej wybierany jest osobnik najlepiej przystosowany i zostaje on przepisany do nowo tworzonej puli rodzicielskiej. Pula ta, złożona ze zwycięzców wcześniejszych turniejów, ma wyższą średnią wartość przystosowania niż średnia wartość tego parametru w populacji. Jednocześnie zostaje zachowana różnorodność osobników. Zmiana wielkości grup turniejowych pozwala sterować naciskiem selektywnym. Losowanie tych grup oraz wybieranie z nich najlepszego osobnika

powtarza się aż do wyznaczenia populacji potomnej. Selekcja metodą turniejową jest pozbawiona wad metody ruletkowej, gdzie konieczność stanowi maksymalizacja przystosowania. W metodzie turniejowej ważna jest jedynie informacja o przewadze jednego osobnika nad pozostałymi. Schemat działania tej metody przedstawiono na rysunku 23,



Rysunek 23 – Schemat działania turniejowej metody selekcji.

- d) selekcja próbkowania deterministycznego – selekcja DS (ang. deterministic selector) – w tej metodzie wyznacza się oczekiwaną średnią wartość przystosowania A_{sr} . Następnie wartość przystosowania każdego osobnika dzieli się przez ten parametr. Jeżeli wyznaczona wartość jest większa lub równa 1, osobnik zostaje skopiowany do następnej generacji. Wolne miejsca w populacji wypełniane są przez rozwiązania, których wartość dzielenia wartości przystosowania przez A_{sr} jest jak najbliższa jedności (Kolendo 2011b),
- e) selekcja stochastycznego próbkowania na podstawie reszty (Michalewicz 1996) – selekcja SRS (ang. stochastic remainder selector) – metoda ta działa na zasadzie zbliżonej do próbkowania deterministycznego. Konieczne jest wyznaczenie wyniku dzielenia wartości przystosowania osobnika przez średnią wartość przystosowania populacji. Osobniki o wartości tego parametru większym lub równym jeden zostają przeniesione do następnej generacji. Różnica polega na wypełnieniu brakujących miejsc populacji o losowe rozwiązania,
- f) selekcja jednolita (ang. uniform selector) – w tej metodzie każdy osobnik ma identyczne prawdopodobieństwo p , aby zostać wybranym do etapu krzyżowania, a p jest równe 1 podzielone przez rozmiar populacji:

$$S_i = \frac{i_{rank}}{\Sigma P} \quad 3.9$$

4.5 Ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść na morzu

Ze względu na przedstawione w rozdziale trzecim wady istniejących metod wyznaczania ścieżek przejść na morzu, rozpoczęto badania nad systemem planowania ścieżek przejść z wykorzystaniem metody ewolucyjnej (Xiao 1997; Śmierzchalski 1997). Algorytmy ewolucyjne zostały po raz pierwszy wykorzystane w procesie wyznaczania ścieżek przejść na morzu w pracy (Śmierzchalski 1997), gdzie opisano algorytm $\mathcal{EP}/N++$. Algorytm został zaprojektowany jako system wspomaganie decyzji dla systemu ARPA. Został on zbudowany na podstawie algorytmu Evolutionary Planner/Navigator – EP/N (Xiao 1997). W modelowanym środowisku ograniczenia stałe opisane są za pomocą wielokątów (Śmierzchalski 1998), a obiekty ruchome jako poruszające się sześciokąty, czyli domeny bezpieczne spotkanych obiektów. W pracy postanowiono nie uwzględniać wymiarów statku własnego z uwagi na małą wartość stosunku długości jednostki do maksymalnej długości obszarów reprezentujących poruszające się obiekty. $\mathcal{EP}/N++$ był wielokrotnie rozwijany (Kolendo 2011a, 2011b; Jaworski 2012; Kuczkowski 2012; Kuczkowski 2014). Wyznaczanie ścieżek przejść w tej metodzie uwzględnia przepisy COLREG poprzez wykorzystanie domen bezpiecznych obiektów. Algorytm hEP/N stanowi rozwinięcie algorytmu $\mathcal{EP}/N++$. Zapis podstawowego kodu algorytmu $\mathcal{EP}/N++$ przedstawiono na rysunku 24.

algorytm_ewolucyjny()

```
{  
  
    int T; /*T – zmienna licznika pokolenia  
    dane_wejściowe_parametryzujące_pracę_algorytmu_ewolucyjnego();  
    dane_wejściowe_opisujące_środowisko();  
    P(T) = tworzenie_populacji_początkowej_chromosomów();  
    ewaluacja_populacji( P(T) );  
    while ( != warunki_końcowe() )  
    {  
  
        /*zakończenie pracy algorytmu ewolucyjnego następuje w przypadku spełnienia  
        testów stopu: określonej liczby populacji lub dokładność spełnienia funkcji  
        przystosowania*/  
  
        T = T + 1;  
        Op = wybór_operatora();  
        Par = wybór_rodziców_lub_rodzica(),  
        tworzenie_i_wprowadzenie_potomka( Op, Par );  
        ewaluacja_populacji ( P(T) );  
        wprowadzenie_nowego_osobnika;  
        wybór_najlepszego_osobnika ( P(T) );  
  
    }  
  
}
```

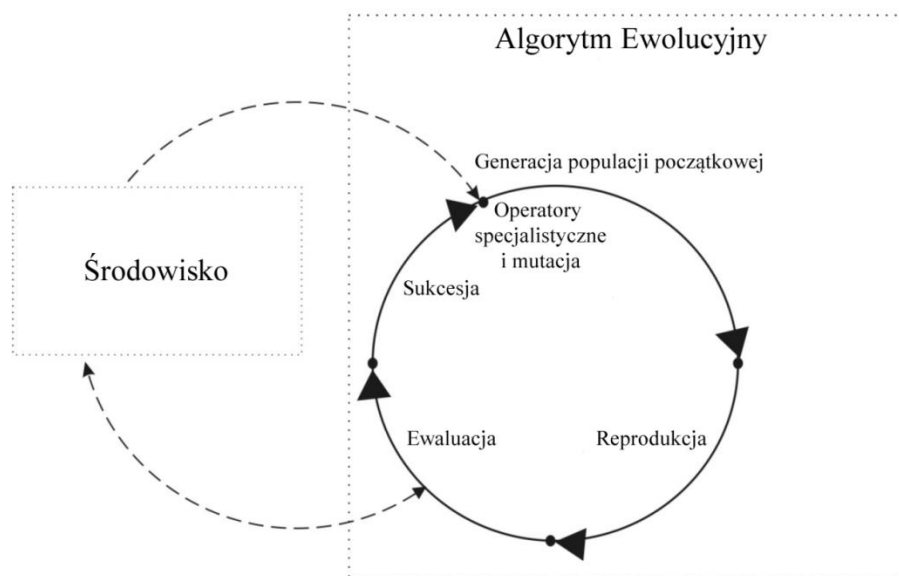
Rysunek 24 – Zapis podstawowego kodu $\mathcal{EP}/N++$ (Śmierzchalski 1997).

Również w pracy (Ito 1999) zaprezentowano algorytm ewolucyjny, który ma na celu wyznaczenie bezpiecznych ścieżek przejść z wykorzystaniem systemu ARPA. Ma on zastosowanie jako element modułu automatycznego sterowania statkiem. Algorytm został zbadany w programie symulacyjnym Shioji-maru.

Kolejną metodę wyznaczania ścieżek przejść w środowisku morskim przedstawiono w pracach opisujących metodę ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii (Szłapczyński 2009, 2012a, 2012b). W metodzie tej nie występuje podział na statek własny i obiekty. Algorytm ewolucyjny rozpatruje wszystkie statki w obserwowanym środowisku i wyznacza ścieżki przejść dla każdej jednostki w trakcie pojedynczego uruchomienia algorytmu. Każdy osobnik populacji stanowi zbiór wyznaczonych bezpiecznych ścieżek przejść. Metoda działa w czasie zbliżonym do rzeczywistego a osiągnięcie tej cechy wymagało opracowania specjalistycznych operatorów genetycznych. Wiązało się to z modyfikacją struktury klasycznego algorytmu ewolucyjnego (rysunek 25) oraz adaptacji funkcji przystosowania. W metodzie tej stanowi ona średnią wartość przystosowania ścieżek przejść danego osobnika. Uwzględnia się czynniki ekonomiczne (rozumiane jako sumaryczną długość wyznaczonej ścieżki przejścia), kary za kolizje z obiektami statycznymi, kary za kolizje z obiektami dynamicznymi oraz zgodność ścieżki z prawidłami COLREG. Elementy te składają się na parametr $fitness_{tri}$ z równania 3.10.

$$fitness = \sum_{i=1}^n \frac{fitness_{tri}}{n} \quad 3.10$$

gdzie n to liczba ścieżek przejść stanowiąca pojedynczego osobnika populacji.



Rysunek 25 – Schemat działania algorytmu ewolucyjnego dla metody ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii (Szłapczyński 2012a).

Kolejny algorytm ewolucyjny wyznaczający bezpieczne ścieżki przejść w środowisku morskim został przedstawiony w pracy (Tsou 2010). W artykule podkreśla się potrzebę budowy systemu wspomagania decyzji dla systemu VTS, gdzie ideę optymalizacji oraz unikania kolizji ogranicza się do przypadków spotkań dwóch statków z podziałem na statek własny i obiekt. Takie podejście może

powodować trudności w przypadku rozwiązywania sytuacji kolizyjnych z udziałem wielu statków – wyznaczone ścieżki nie gwarantują bezpieczeństwa. Zastosowano alternatywny sposób kodowania genotypu. W pracy (Śmierzchalski 1998) pojedynczy osobnik opisany jest przez współrzędne geograficzne punktu zwrotu oraz prędkości statku na danym odcinku ścieżki do następnego punktu zwrotu. W pracy (Szałpczyński 2012a) wykorzystano ten sam sposób kodowania pojedynczej ścieżki przejścia. W algorytmie (Tsou 2010) zaproponowano uproszczenie tego modelu. Pojedynczy osobnik tego algorytmu składa się z następujących parametrów:

- czasu do punktu zwrotu,
- kąta zmiany kursu koniecznego do uniknięcia kolizji,
- czasu pomiędzy zmianą kursu (uniknięcie kolizji) a czasem powrotu na zadany kurs,
- kąta powrotu na zadany kurs.

Przy użyciu funkcji przystosowania, algorytm szuka najkrótszej ścieżki, która przy minimalnej zmianie kursu pozwoli uniknąć kolizji i jak najszybciej powrócić na zadany kurs.

4.6 Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono metodę ewolucyjną, którą wykorzystano w algorytmie hEP/N. Opisano również wybrane modyfikacje algorytmów ewolucyjnych, które znalazły zastosowanie w omawianym algorytmie. Ponadto przedstawiono przegląd metod wykorzystujących algorytm ewolucyjny w problemie wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść na morzu.

Wybrane elementy algorytmu $\mathfrak{hEP/N}^{++}$ zostaną przedstawione w następnym rozdziale jako komponenty wspólne dla opracowanego algorytmu hEP/N. W rozdziale tym, ze względu na ich podobieństwo, porównano również hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść do metody ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii.

5 Hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść

Analiza literatury wykazała, że istnieją jedynie nieliczne metody pozwalające na wyznaczanie bezpiecznych ścieżek przejść dla wielu obiektów w obszarach o dużym natężeniu ruchu, czyli objętych nadzorem systemu VTS. Jest więc uzasadnione opracowanie metody, która pozwoli wyznaczyć te ścieżki dla wszystkich statków w obserwowanym środowisku. Problem wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść dla wielu obiektów w obszarze o dużym natężeniu ruchu, którego dotyczy opracowana hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść, został zdefiniowany w pierwszym rozdziale pracy i brzmi następująco:

Dane jest środowisko o ograniczonym obszarze, w którym znajdują się obiekty statyczne i dynamiczne. Należy wyznaczyć ścieżki przejść dla obiektów dynamicznych umożliwiające każdemu z tych obiektów pokonanie zakładanej trasy. Ścieżki te muszą spełniać warunki omijania przeszkód statycznych (łądy, obszary ograniczenia ruchu) i dynamicznych (inne statki) oraz uwzględniać ekonomikę żeglugi (długość trasy, zakres zmian kursu i czas przebycia ścieżki przejścia), jak również przepisy COLREG. Za środowisko przyjmuje się obszar o dużym natężeniu ruchu.

W hierarchicznej ewolucyjnej metodzie wyznaczania ścieżek przejść dane wejściowe dotyczące między innymi bieżącej pozycji, kursu i prędkości obiektów znajdujących się w obserwowanym środowisku można pozyskać z systemu AIS. Dane te pozwalają na wykrycie potencjalnych sytuacji kolizyjnych oraz wyznaczenie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść dla wszystkich obserwowanych jednostek. Należy również zapewnić, aby ścieżki te były zgodne z przepisami COLREG. W ramach tych przepisów określone są zasady wyznaczania pierwszeństwa drogi statku w sytuacji potencjalnej kolizji. Możliwe jest zatem opracowanie hierarchii jednostek rozumianej jako uporządkowany zbiór statków obecnych w obserwowanym środowisku. Pozycja danej jednostki w tym zbiorze określać będzie, którym statkom dana jednostka ustępuje drogi według przepisów COLREG.

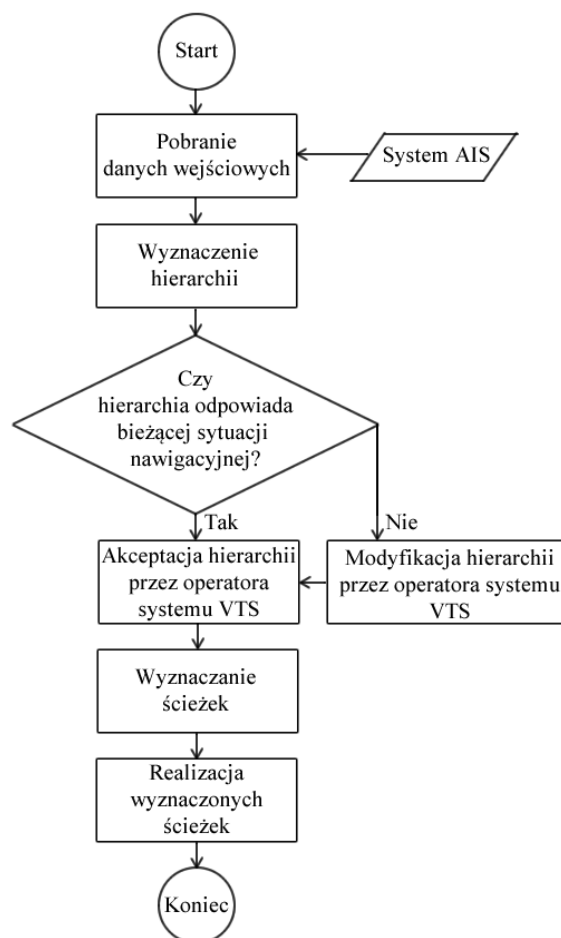
Algorytm hEP/N, który wykorzystuje hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść, wyznacza hierarchię dla wszystkich statków w obserwowanym środowisku. W następnym kroku, dane wejściowe oraz wyznaczona hierarchia wykorzystywane są w algorytmie hEP/N celem wyznaczenia zbioru bezpiecznych ścieżek przejść dla tych jednostek. Algorytm ten stanowi zmodyfikowaną wersję algorytmu $\mathfrak{H}EP/N++$ (Śmierzchalski 1998). Algorytm w wersji hEP/N pozwala na wyznaczenie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść dla wszystkich statków w obserwowanym środowisku, wykorzystując przy tym wyznaczoną hierarchię tych jednostek. Dla statku znajdującego się na najwyższej pozycji w hierarchii, ścieżka przejścia wyznaczana jest z uwzględnieniem jedynie ograniczeń statycznych. Przy poszukiwaniu ścieżki przejścia dla drugiego statku w hierarchii, algorytm uwzględnia konieczność uniknięcia kolizji z wcześniej rozpatrywaną jednostką. Dla kolejnych statków, wyznaczane ścieżki przejść muszą zapewnić brak kolizji ze wszystkimi jednostkami znajdującymi się na wyższych pozycjach w hierarchii. Każda jednostka musi również unikać ograniczeń statycznych.

Rezultatem działania algorytmu hEP/N jest zbiór bezpiecznych ścieżek przejść, który może zostać wykorzystany przez operatora systemu VTS celem koordynacji ruchu statków obecnych w obserwowanym środowisku. Proponowana metoda wyznaczania ścieżek przejść może zatem być zastosowana jako system wspomagania decyzji rozszerzający funkcjonalność systemu VTS.

Hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść składa się z następujących etapów (rysunek 26):

1. Wprowadzenie danych wejściowych o statkach znajdujących się w obserwowanym środowisku do algorytmu hEP/N.
2. Wyznaczenie hierarchii statków znajdujących się w obserwowanym środowisku w oparciu o przepisy COLREG.
3. Akceptacja hierarchii statków. Jeżeli wyznaczona przez algorytm hierarchia nie odpowiada bieżącej sytuacji nawigacyjnej w obserwowanym środowisku, możliwa jest jej modyfikacja przez operatora systemu VTS.
4. Wyznaczenie ścieżek, zdefiniowane jako wyznaczenie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść dla wszystkich statków w obserwowanym środowisku.
5. Realizacja wyznaczonych ścieżek przejść.

Opis poszczególnych etapów działania hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść (rysunek 26) został przedstawiony w kolejnych podrozdziałach.



Rysunek 26. Schemat hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść.

5.1 Dane wejściowe

Pierwszym etapem hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść jest pozyskanie danych wejściowych dla algorytmu hEP/N. Dane te wykorzystuje się zarówno w procesie określania hierarchii, jak również przy wyznaczaniu zbioru bezpiecznych ścieżek przejść.

Dla dowolnego, znajdującego się w obserwowanym obszarze statku S_t , określa się następujące parametry wejściowe:

- pozycja początkowa D_p ,
- pozycja docelowa D_d ,
- kurs ψ ,
- prędkość v ,
- typ statku T_p ,
- status nawigacyjny S_n , wprowadzany przez obsługę statku. Parametr ten określa czynność wykonywaną w danym momencie przez statek, np. statek zajęty połowem.
- informacje dotyczące bezpieczeństwa (ważne ostrzeżenia nawigacyjne) dostępne w systemie AIS.

Dane o pozycji początkowej D_p statku można uzyskać zarówno z systemu AIS jak i przy użyciu radarów systemu VTS. Międzynarodowe Stowarzyszenie Służb Oznakowania Nawigacyjnego (ang. International Association of Lighthouse Authorities – IALA) zaleca jednak wykorzystywanie w tym celu systemu AIS (IALA 2001) z następujących powodów:

- a) zasięgu odczytu pozycji – ze względu na swoją budowę, system AIS pozwala na odczyt pozycji statków, które nie są widoczne w zasięgu radarów systemu VTS.
- b) dokładności odczytu pozycji – system AIS pozwala na odczyt pozycji statku z dokładnością mniejszą niż 10 metrów pod warunkiem użycia korekcji sygnału z systemu DGNS (ang. Differential Global Navigation Satellite System – Różnicowy Globalny System Nawigacji Satelitarnej). Dokładność pomiaru z radarów systemu VTS wynosi 30 - 50 metrów (IALA 2001; Wawruch 2008).
- c) braku tzw. obszarów zacieniowanych (ang. radar shadow) (Moszkowicz 2008) – w obszarach przybrzeżnych i portowych istnieje ryzyko, że statki nie będą widoczne na radarze lub pomiar będzie niedokładny ze względu na bliskość lądu lub budynków. Na takim obszarze system VTS może nie mieć możliwości śledzenia danej jednostki, co jest szczególnie ważne w procesie unikania kolizji. Warto jednak zauważyć, że problem ten dotyczy również systemu AIS, choć błędy będą pojawiać się rzadziej niż w przypadku pomiarów radarowych (IALA 2001).
- d) dokładności pomiaru na obszarach o dużym natężeniu ruchu – istnieje ryzyko, że dwa statki poruszające się w małej odległości od siebie, zostaną odczytane przez radar jako jedna jednostka. Problem ten nie dotyczy systemu AIS.
- e) danych przekazywanych w czasie zbliżonym do rzeczywistego – radary systemu VTS mierzą prędkość v oraz kurs ψ statków wykorzystując historię pomiarów. System AIS przekazuje te dane bezpośrednio z przyrządów nawigacyjnych znajdujących się na danym statku w dziesięciosekundowych interwałach (Wawruch 2002).
- f) ograniczonego wpływu sytuacji hydrometeorologicznej na jakość pomiaru – W przypadku intensywnych opadów deszczu lub śniegu mogą pojawić się błędy lub brak możliwości odczytu pozycji przy użyciu radarów VTS. Sytuacja hydrometeorologiczna w mniejszym stopniu wpływa na jakość sygnału z systemu AIS.

Uwzględniając przedstawione powyżej cechy, w celu pozyskania pozycji początkowej Dp statku proponuje się wykorzystanie systemu AIS.

W przypadku pozycji docelowej Dd statku parametr można odczytać jedynie z systemu AIS. Gdy pozycja docelowa statku nie jest wprowadzona do tego systemu lub też znajduje się poza obserwowanym obszarem, w hierarchicznej ewolucyjnej metodzie wyznaczania ścieżek przejść możliwe jest wyznaczenie jej na podstawie informacji o bieżącym kursie ψ . Kurs ten dostępny jest w systemie AIS (IALA 2001). Również prędkość v jednostki odczytać można z tego systemu. W systemie AIS prędkość mierzona jest z większą dokładnością niż w przypadku pomiarów z użyciem radaru. Jest to istotne szczególnie dla statków poruszających się z małą prędkością (WWW – SJO). Typ statku Tp , status nawigacyjny Sn jednostki oraz informacje dotyczące bezpieczeństwa to parametry dostępne jedynie w systemie AIS (Wawruch 2002).

Należy podkreślić, że dokładność informacji dostępnych w systemie AIS definiuje skuteczność hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść. Analiza zdatności danych wejściowych systemu została przedstawiona w rozdziale 9.5.5.

5.2 Wyznaczanie pozycji w hierarchii dla statków w obserwowanym środowisku

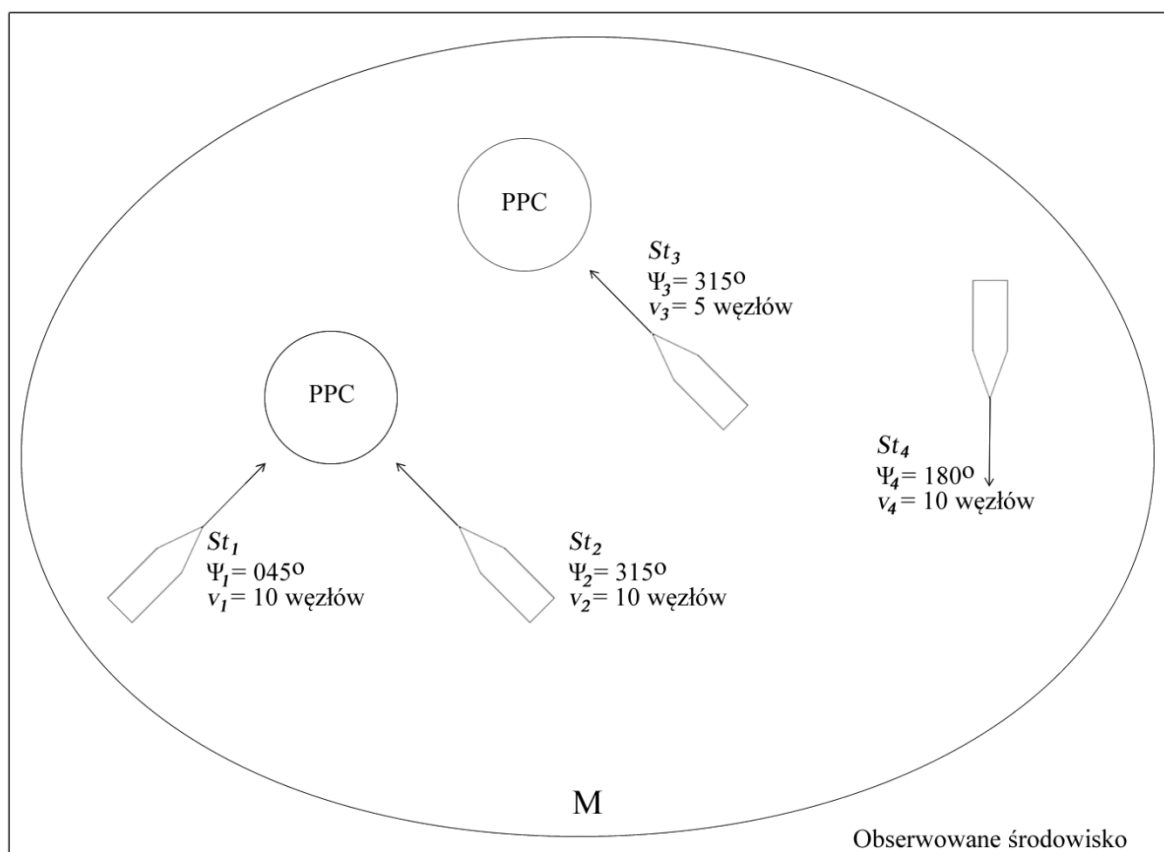
Proces wyznaczania pozycji j w hierarchii opartej o prawa COLREG dla n statków w obserwowanym środowisku złożony jest z trzech etapów:

1. Wprowadzenie danych wejściowych do algorytmu hEP/N (Rozdział 5.1) – na podstawie danych wejściowych tworzony jest uporządkowany zbiór \mathbf{M} , złożony z n statków St_i w obserwowanym środowisku. Indeks $i = 1, 2, \dots, n$ oznacza pozycję danej jednostki w zbiorze \mathbf{M} .
2. Identyfikacja statków zagrożonych kolizją – wyznaczając punkty potencjalnej kolizji PPC dla statków w zbiorze \mathbf{M} określa się pary statków, które znajdują się w sytuacji zagrażającej kolizją.
3. Wyznaczenie pozycji j w hierarchii dla statków w zbiorze \mathbf{M}

Opis poszczególnych etapów wyznaczania hierarchii przedstawiono poniżej.

5.2.1 Wprowadzenie danych wejściowych do algorytmu hEP/N

Dane wejściowe hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść, opisane w podrozdziale 5.1, wykorzystuje się zarówno podczas określania pozycji danego statku w hierarchii jak również w procesie wyznaczania ścieżek. Na etapie określania pozycji w hierarchii, statki St_i opisane są przez parametry: pozycji początkowej Dp_i , pozycji docelowej Dd_i , kursu ψ_i , prędkości v_i , typu statku tp_i oraz statusu nawigacyjnego Sn_i . Zbiór statków \mathbf{M} tworzy n jednostek St_i , gdzie $i = 1, 2, \dots, n$. W początkowym etapie algorytmu, indeks i statku St_i określony jest przez kolejność wprowadzenia jednostki do środowiska algorytmu hEP/N. Oznacza on również pozycję statku w zbiorze \mathbf{M} . Pierwsza wprowadzona do tego algorytmu jednostka stanie się statkiem St_1 i jednocześnie pierwszym elementem zbioru \mathbf{M} . Kolejne dodawane jednostki zostaną określone zmienną St_i i znajdą się na i -tej pozycji w zbiorze \mathbf{M} . Na rysunku 27 przedstawiono sytuację nawigacyjną, która posłuży jako przykład dla opisywanego procesu wyznaczania pozycji statków w hierarchii w obserwowanym środowisku.



Rysunek 27. Przykładowa sytuacja nawigacyjna na morzu. Oznaczenia: $St_i, i = \{1, 2, \dots, 4\}$ - i -ty statek w obserwowanym środowisku, ψ_i - kurs i -tego statku, v_i - prędkość i -tego statku.

W przedstawionym na rysunku 27 środowisku znajdują się cztery jednostki. Statek St_1 porusza się kursem 045° , a statki St_2 i St_3 kursem 315° . Jednostka St_4 płynie kursem 180° . Statek St_3 płynie z prędkością 5 węzłów, pozostałe jednostki poruszają się z prędkością 10 węzłów. Jednostki te tworzą zbiór $\mathbf{M} = \{St_1, St_2, St_3, St_4\}$ statków w obserwowanym środowisku. Zbiór \mathbf{M} jest zbiorem uporządkowanym, a kolejność jego elementów jest zdeterminowana kolejnością dodawania statków St_i do środowiska algorytmu hEP/N.

Po wprowadzeniu do algorytmu hEP/N danych wejściowych dla wszystkich statków w obserwowanym środowisku, możliwe jest wyznaczenie podzbiorów statków zagrożonych i niezagrażonych kolizją.

5.2.2 Identyfikacja statków zagrożonych kolizją

Prawidła COLREG określają pierwszeństwo drogi statku w sytuacji potencjalnej kolizji dwóch jednostek. Dlatego też proces wyznaczania pozycji w hierarchii odbywa poprzez określenie, czy dany statek ustępuje drogi danej jednostce, czy odwrotnie: statek ten ma pierwszeństwo drogi według prawideł COLREG w warunkach dobrej widzialności. Jednostka, dla której w danej chwili wyznaczana jest pozycja w hierarchii nazywany jest statkiem analizowanym. Statki, względem których pozycja ta jest wyznacza określa się jako obiekty.

Zbiór wszystkich statków \mathbf{M} zawiera n statków St_i :

$$\mathbf{M} = \{St_1, St_2, \dots, St_n\} \quad (5.1)$$

W zbiorze tym określa się jednostki, które nie znajdują się w sytuacji zagrożenia kolizją oraz statki, którym grozi zderzenie z inną jednostką. Statki, którym w obserwowanym środowisku nie grozi kolizja z żadną jednostką, znajdują się w podzbiorze jednostek bezpiecznych \mathbf{Mb} . Dla takich statków nie wyznacza się pozycji w hierarchii, ponieważ bezpieczeństwo ścieżki przejścia wyznaczonej przez algorytm hEP/N dla takiej jednostki zależy jedynie od kolizji z przeszkodami statycznymi. Nie jest więc konieczne badanie zależności określających pierwszeństwo drogi względem innych jednostek dla takiego statku. Pozostałe statki znajdują się w zbiorze statków zagrożonych kolizją \mathbf{Mk} .

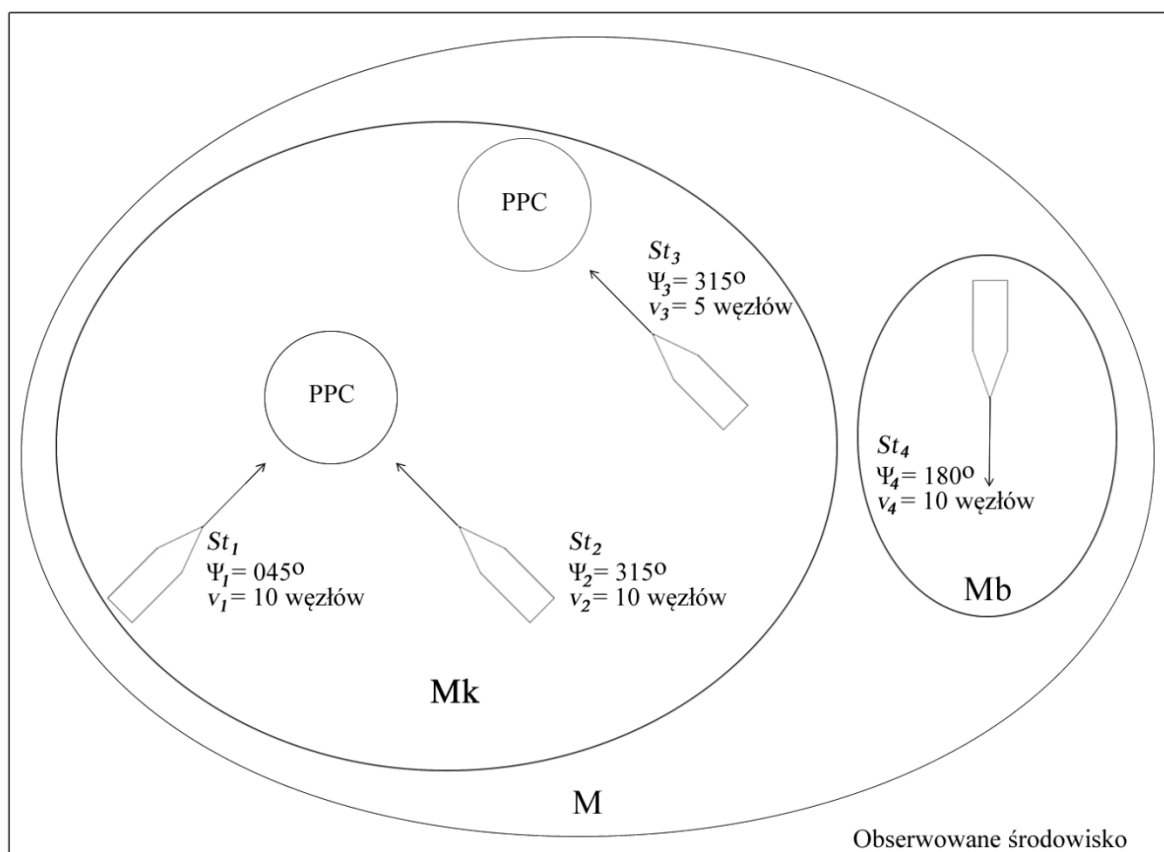
Zbiór \mathbf{M} można zatem podzielić na podzbiór \mathbf{Mb} i podzbiór \mathbf{Mk} :

$$\mathbf{M} = \mathbf{Mb} \cup \mathbf{Mk} \quad (5.2)$$

Aby wyznaczyć podzbiory zbioru \mathbf{M} dla każdej jednostki w obserwowanym środowisku algorytm hEP/N poszukuje optymalnej ścieżki przejścia uwzględniając jedynie ograniczenia statyczne. Na tym etapie pomija się ograniczenia dynamiczne. Tak wyznaczone ścieżki przejść pozwalają określić statki, które znajdują się w sytuacji zagrożenia kolizją. Jeżeli ścieżki przejść dwóch statków przecinają się i istnieje taka chwila czasu t , w której jeden z tych statków narusza domenę bezpieczną drugiego, jednostki te będą zagrożone kolizją. Tak opisane punkty przecięcia ścieżek przejść dwóch statków nazywane są punktami potencjalnej kolizji – PPC.

Proces wyznaczania ścieżek przejść oraz określania punktów potencjalnej kolizji opisano w podrozdziale 5.3. Należy stwierdzić, że na tym etapie algorytmu, proces ten odbywa się w czasie zbliżonym do rzeczywistego i nie wpływa na czas wyznaczenia rozwiązania danej sytuacji nawigacyjnej przez algorytm hEP/N.

Podzbiory jednostek zagrożonych i niezagrożonych kolizją zbioru \mathbf{M} dla przykładowej sytuacji nawigacyjnej z rysunku 27 przedstawiono na rysunku 28. W zbiorze \mathbf{M} znajdują się 4 statki. Zbiór \mathbf{Mk} zawiera jednostki od St_1 do St_3 . Statki te znajdują się w zbiorze statków zagrożonych kolizją, ponieważ statkowi St_1 grozi potencjalna kolizja z jednostkami St_2 i St_3 . W zbiorze \mathbf{Mb} znajduje się statek St_4 , któremu nie grozi zderzenie z żadną z pozostałych jednostek.



M = $\{St_1, St_2, St_3, St_4\}$

Mk = $\{St_1, St_2, St_3\}$

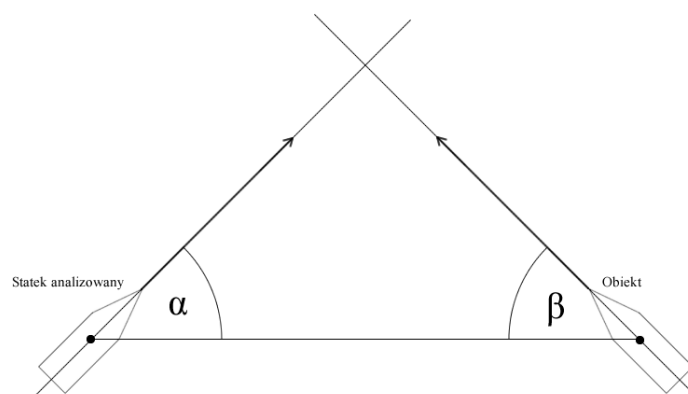
Mb = $\{St_4\}$

Rysunek 28. Przykładowa sytuacja nawigacyjna z rysunku 27 z zaznaczonymi zbiorami statków zagrożonych kolizją **Mk** i niezagrażonych kolizją **Mb**.

Po określeniu podzbiorów zbioru **M** algorytm przechodzi do następnego etapu, w którym zostanie wyznaczona pozycja w hierarchii dla statków zagrożonych kolizją w podzbiorze **Mk**.

5.2.3 Wyznaczenie pozycji statków w hierarchii

W procesie wyznaczania pozycji w hierarchii dla zbioru **Mk** określa się, który statek posiada pierwszeństwo drogi według prawideł COLREG. Podobnie jak w pracy (Lisowski 1981) wykorzystuje się w tym celu informację o kursie oraz pozycji jednostek zagrożonych kolizją, a także sytuację nawigacyjną oraz typ statku. Określa się również kąt kursowy oraz aspekt. Przez kąt kursowy przyjmuje się kąt zawarty między dziobową linią symetrii statku analizowanego a linią łączącą statek analizowany z obiektem. Aspekt jest to kąt zawarty między dziobową linią symetrii obiektu a linią łączącą obiekt ze statkiem analizowanym (Wróbel 2009). Graficzną reprezentację pojęć kąta kursowego i aspektu przedstawiono na rysunku 29. W pracy przyjmuje się, że kąt kursowy i aspekt przyjmują wartości od 0° do 180° na prawej burcie statku analizowanego (w przypadku kąta kursowego) lub obiektu (dla aspektu) i analogicznie od 0° do -180° na lewej burcie. Jest to oznaczenie połówkowe kąta kursowego oraz aspektu (Wróbel 2009).



Rysunek 29 – Graficzna reprezentacja pojęć kąta kursowego (α) i aspektu (β)

Określenie pozycji w hierarchii dla statków ze zbioru **Mk** polega na uporządkowaniu n_{Mk} elementów (statków) tego zbioru. Zmiana kolejności elementów odbywa się poprzez sprawdzenie, czy statek analizowany ustępuje drogi danemu obiektowi według prawideł COLREG. Jeżeli danej jednostce statek ten ustępuje drogi, obiekt zamienia swoją pozycję w zbiorze **Mk** i zostaje umieszczony przed statkiem analizowanym w tym zbiorze. Jeżeli statek ten posiada pierwszeństwo drogi, pozycja w zbiorze **Mk** zarówno statku analizowanego jak i obiektu nie ulega zmianie. Proces wyznaczania hierarchii w uporządkowanym zbiorze **Mk** rozpoczyna się od pierwszego statku w tym zbiorze. Gdy zostanie określone pierwszeństwo drogi względem wszystkich obiektów, statek zostaje wyłączony z dalszej analizy. Ustalono już bowiem, którym statkom jednostka ta ustępuje drogi, a wobec których ma pierwszeństwo drogi. Statkiem analizowanym staje się następny statek w danym zbiorze **Mk**. Proces ten jest powtarzany dla każdego statku w danym zbiorze **Mk** z wyjątkiem ostatniego elementu tego zbioru. Jego pozycja w hierarchii zbioru **Mk** jest już na tym etapie określona.

Na rysunku 30 przedstawiono algorytm pozwalający określić pozycję statków w hierarchii w danym zbiorze **Mk**. Proces ten rozpoczyna wybór statku analizowanego oraz obiektu ze zbioru **Mk**. Następnie sprawdza się, czy między statkiem analizowanym a obiektem zachodzi ryzyko kolizji. Jeżeli między dwoma statkami istnieje zagrożenie zderzeniem, sprawdzany jest warunek wyprzedzania (prawidło 13 COLREG). Statek analizowany wyprzedza obiekt, jeżeli aspekt obiektu jest większy niż 112.5° na dowolnej burcie (Oznaczenie $\pm 112.5^\circ$ na rysunku 30) (Goodwind 1975;

Rymarz 2004). Jeżeli statek analizowany nie wyprzedza obiektu, należy sprawdzić, czy jednostka ta jest wyprzedzana przez ten obiekt. Sytuacja taka występuje, gdy kąt kursowy jest większy niż 112.5° na dowolnej burcie. Jeżeli jednostki nie uczestniczą w manewrze wyprzedzania, należy przejść do kolejnego kroku. Określa się wtedy, czy statek analizowany lub obiekt posiadają pierwszeństwo drogi ze względu na status nawigacyjny lub typ statku (prawidło 18 COLREG). W prawidło 18 COLREG zapisano, że statki:

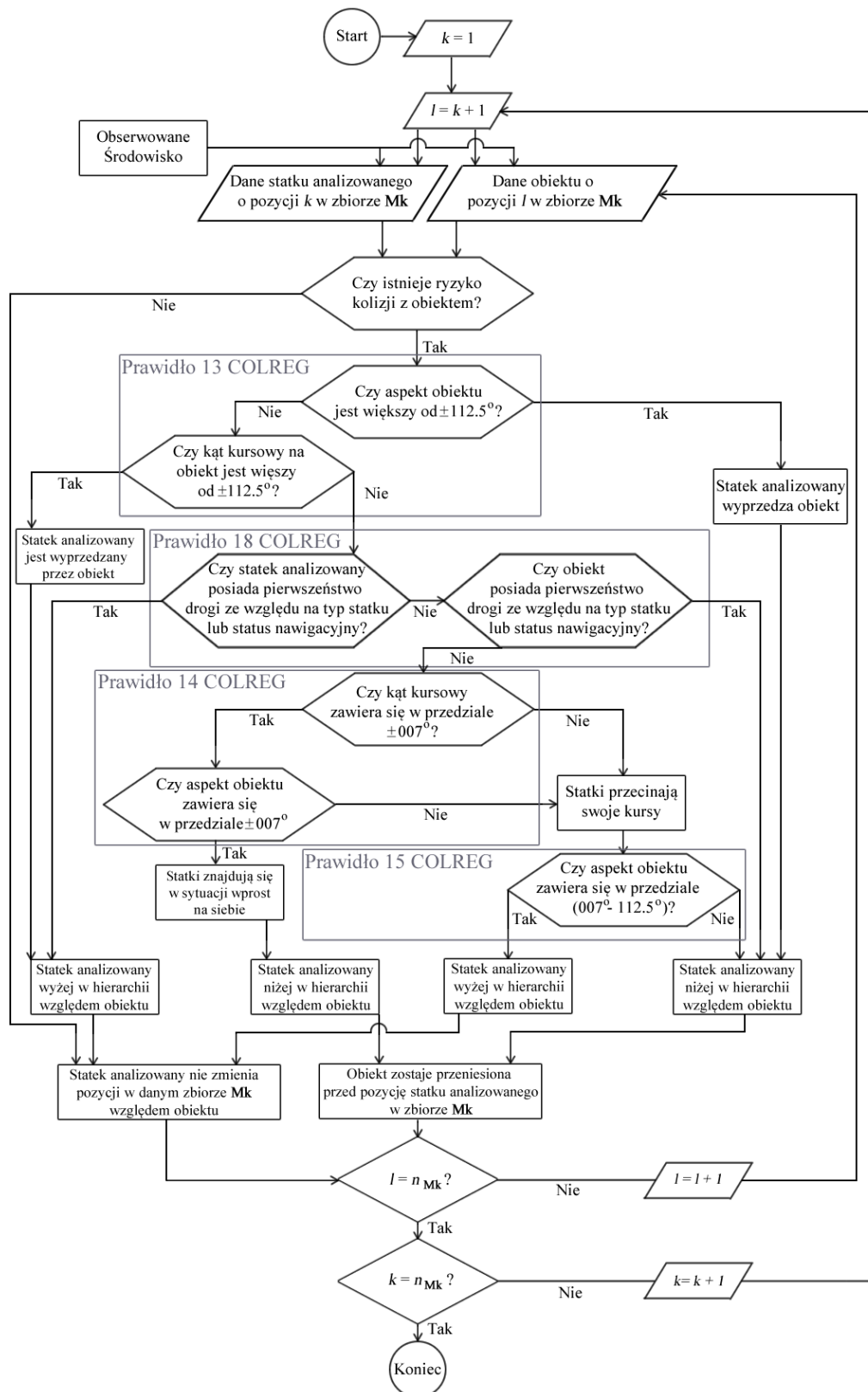
- nieodpowiadające za swoje ruchy,
- o ograniczonej zdolności manewrowej,
- zajęte połowem,
- żaglowe

będą posiadać pierwszeństwo drogi w sytuacjach potencjalnej kolizji. Definicje wymienionych statusów nawigacyjnych, jak również treść cytowanych prawideł COLREG, przedstawiono w dodatkach 9.1 i 9.2. Jeżeli żaden z dwóch badanych statków nie posiada pierwszeństwa drogi ze względu na status nawigacyjny lub typ statku względem drugiej jednostki, przechodzi się do kolejnego kroku. Na tym etapie należy określić, czy statki znajdują się w sytuacji na wprost na siebie, tzn. czy kąt kursowy oraz aspekt zawierają się w przedziale $\pm 7^\circ$. Gdy ten warunek jest spełniony, statek analizowany nie posiada pierwszeństwa drogi (prawidło 14 COLREG). Jeżeli statki nie znajdują się w sytuacji wprost na siebie, oznacza to, że ich kursy się przecinają. W takim przypadku statek, który ma drugą jednostkę na prawej burcie, powinien ustąpić mu drogi (prawidło 15 COLREG). Statek analizowany posiada pierwszeństwo drogi, jeżeli aspekt zawiera się w przedziale od 7° do 112.5° .

Gdy zostanie wyznaczona hierarchia dla statków ze zbioru **Mk**, zbiór ten zostaje uzupełniony o statki ze zbioru **Mb**. Statki ze zbioru **Mb** nie stwarzają zagrożenia kolizją pozostałym jednostkom. W konsekwencji algorytm hEP/N wyznacza dla tych jednostek identyczne lub zbliżone ścieżki przejść niezależnie od ich pozycji w hierarchii. Korzystniej jest zatem w pierwszej kolejności wyznaczyć ścieżki przejść dla statków zagrożonych kolizją. Do dla tych jednostek występuje konieczność reakcji operatora systemu VTS. Wczesna znajomość optymalnych, bezpiecznych ścieżek przejść dla statków zagrożonych kolizją pozwoli operatorowi możliwie najszybciej skontaktować się z tymi jednostkami. Dlatego też statki ze zbioru **Mb** znajdują się na ostatnich miejscach w hierarchii zbioru **M**.

Sposób działania algorytmu z rysunku 30 można przedstawić analizując zbiór statków **Mk** z rysunku 28. Zbiór ten zawiera trzy statki: St_1 , St_2 i St_3 zagrożone kolizją. Statek St_1 zajmuje pierwszą pozycję, St_2 drugą, a St_3 trzecią w uporządkowanym zbiorze **Mk**. W omawianej sytuacji pierwszy badany jest statek St_1 . Według prawideł COLREG ustępuje on drogi obu obiektom: St_2 i St_3 (prawidło 15 COLREG). Po tym kroku statek analizowany zostaje przesunięty na ostatnią pozycję zbioru **Mk**, czyli $\mathbf{Mk}=\{St_2, St_3, St_1\}$. W drugim kroku statkiem analizowanym zostaje jednostka St_2 . Statkowi temu nie grozi kolizja z obiektem St_3 , więc kolejność elementów w zbiorze **Mk** nie zmienia się. Algorytm kończy działanie, ponieważ zostało już określone względem których jednostek statek St_3 posiada pierwszeństwo drogi, a którym ustępuje drogi. Oznacza to, że w zbiorze **Mk** statek St_2 znajduje się na pozycji w hierarchii $j=1$, podczas gdy pozycja w hierarchii dla statku St_3 wynosi $j=2$ i $j=3$ dla statku St_1 . Aby uzyskać hierarchię dla zbioru **M**, hierarchię zbioru **Mk** należy uzupełnić o statek St_4 ze zbioru **Mb**. Statek ten zostaje dodany jako ostatni element hierarchii dla zbioru **M** ($j=4$ dla statku St_4).

Wyznaczona przez algorytmu z rysunku 30 hierarchia dla statków w obserwowanym środowisku zostaje przedstawiona operatorowi systemu VTS celem akceptacji.



Rysunek 30. Algorytm wyznaczania pozycji w hierarchii w zbiorze statków zagrożonych kolizją M_k . Oznaczenia: n_{M_k} - liczba statków w zbiorze M_k , k - pozycja statku analizowanego w zbiorze M_k , l - pozycja obiektu w zbiorze M_k .

5.2.4 Akceptacja wyznaczonej hierarchii

Kolejny etap stanowi zatwierdzenie hierarchii przez operatora systemu VTS. Hierarchia ta wyznaczana przez algorytm przedstawiony na rysunku 30 pozwala na wyznaczenie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść zgodnych z prawidłami COLREG dla wszystkich jednostek w obserwowanym środowisku pod warunkiem, że dane wejściowe są pozbawione błędów. Istnieje jednak szereg czynników, które mogą potencjalnie wpływać na pozycję danego statku w hierarchii, a których nie można uwzględnić w algorytmie z rysunku 30. Zgodnie z tym należy pozostawić możliwość modyfikacji hierarchii przez operatora systemu VTS.

Pierwszym przypadkiem, w którym wyznaczona hierarchia może wymagać zmiany, jest sytuacja gdy dane wejściowe z systemu AIS są błędne. Należy tutaj rozważyć typ statku oraz jego status nawigacyjny. Są to dane statyczne deklarowane w systemie AIS przez członków załogi danej jednostki. Istnieje zatem możliwość, że parametry te będą niepoprawne, np. gdy statek o napędzie mechanicznym figuruje w systemie AIS jako statek żaglowy lub gdy jednostka wracająca do portu w systemie AIS wciąż będzie widnieć jako „zajęta połowem”. Badania opisane w pracy (Eriksen 2006) wykazały, że aż 30% statków miało nieprawidłowo ustawiony status nawigacyjny, a 6% nie zadeklarowało żadnego statusu nawigacyjnego. Uogólniając, niektóre dane w systemie AIS narażone są na błędy ludzkie. Możliwość zmiany hierarchii przez operatora VTS stwarza możliwość reagowania na te nieprawidłowości. Dzięki temu algorytm hEP/N wyznaczy ścieżki względem hierarchii, która jak najprecyzyjniej odpowiada sytuacji nawigacyjnej w obserwowanym środowisku.

Drugą sytuacją, w której konieczna będzie zmiana wyznaczonej hierarchii, jest potencjalny scenariusz, w którym jednostka ustępująca drogi wg prawideł COLREG nie czyni tego ze względu np. na poważną awarię. Jeżeli operator systemu VTS zidentyfikuje taką sytuację, może umieścić jednostkę z pierwszeństwem drogi wg. prawideł COLREG na niższym miejscu w hierarchii. Pozwoli to na wyznaczenie ścieżki przejścia, która umożliwi uniknięcie kolizji z uszkodzoną jednostką. Przykład sytuacji, w której statek ustępujący drogi według prawideł COLREG nie mógł tego uczynić ze względu na awarię, przedstawiono w artykule (WWW – SFS).

Innym czynnikiem, który operator systemu VTS powinien na tym etapie uwzględnić, jest informacja dotycząca bezpieczeństwa dostępna w systemie AIS. W publikacji (Wawruch 2002) parametr ten opisuje się następująco:

„Krótka wiadomość dotycząca bezpieczeństwa jest szczególnym przypadkiem wiadomości binarnej i może być wysyłana jako wiadomość adresowana lub (wiadomość nr 12) lub rozgłoszeniowa (wiadomość nr 14). Podobnie jak wiadomości nr 6 i 8, może zawierać do 160 sześciobitowych znaków ASCII. Należy ją traktować jako dodatkową w stosunku do GMDSS metodę rozpowszechniania informacji związanych z bezpieczeństwem. Do potwierdzania jej odbioru służy wiadomość nr 7.”

Parametr ten może być dowolnie modyfikowany przez decydenta, co uniemożliwia jego uwzględnienie w algorytmie przedstawionym na rysunku 30. Informacja dotycząca bezpieczeństwa może potencjalnie zawierać dane wpływające na pozycję statku w hierarchii, np. ostrzeżenie o poważnej awarii statku, która uniemożliwia zmianę kursu.

Ostatnim rozpatrywanym przypadkiem, kiedy konieczna jest reakcja operatora systemu VTS, jest sytuacja potencjalnej kolizji więcej niż dwóch jednostek w pojedynczym punkcie PPC. Prawidła COLREG nie regulują pierwszeństwa drogi dla tak opisanej sytuacji, dlatego też algorytm z rysunku

30 nie wyznaczy poprawnej hierarchii. Przypadek kolizji trzech jednostek w pojedynczym punkcie potencjalnej kolizji został zbadany w rozdziale 6.

Istnieje również możliwość zmiany hierarchii jednostek gdy w środowisku panują warunki ograniczonej widzialności. W takim wypadku operator systemu VTS może zmodyfikować hierarchię, by ograniczyć lub wyeliminować ryzyko kolizji. Zbliżony przypadek zbadano w rozdziale 6.3.

Warto tu jednak podkreślić, że etap ten przewidziano jedynie jako odpowiedź na sytuacje nawigacyjne, w których hierarchia wyznaczona przez algorytm z rysunku 30 nie będzie odpowiadać bieżącej sytuacji nawigacyjnej w obserwowanym środowisku. Uwzględniając jednak wysoki poziom błędów statusu nawigacyjnego statku określonego w pracy (Eriksen 2006), możliwe jest, że weryfikacja hierarchii przez operatora systemu VTS będzie konieczna przed każdym wyznaczeniem zbioru bezpiecznych ścieżek przejść przez algorytm hEP/N.

Po zatwierdzeniu hierarchii przez operatora systemu VTS, rozpoczyna się proces wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść w algorytmie hEP/N.

5.3 Wyznaczanie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść w algorytmie hEP/N

Wyznaczenie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść w algorytmie hEP/N polega na poszukiwaniu dla każdej jednostki w obserwowanym środowisku bezpiecznej ścieżki przejścia uwzględniając daną sytuację nawigacyjną. Kolejność tych poszukiwań uwarunkowana jest wcześniej wyznaczoną hierarchią. Dla statku St_j znajdującego się na najwyższej pozycji j w hierarchii, ścieżka przejścia jest wyznaczana uwzględniając w środowisku jedynie ograniczenia statyczne. Każde zakończone poszukiwanie ścieżki powoduje modyfikację środowiska algorytmu hEP/N. Jednostka, dla której wyznaczona została bezpieczna ścieżka Rd_j , jest wprowadzana do środowiska algorytmu hEP/N jako ograniczenie dynamiczne $Dm(t)_j$ poruszające się wzdłuż tej ścieżki z prędkością v_j w czasie t . Proces poszukiwania ścieżki i wprowadzania jej do środowiska algorytmu hEP/N powtarzany jest dla wszystkich statków w obserwowanym środowisku. Każda jednostka musi unikać ograniczeń statycznych oraz wprowadzanych ograniczeń dynamicznych.

Wyznaczanie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść w algorytmie hEP/N przedstawiono na rysunku 31. Proces ten składa się z następujących kroków:

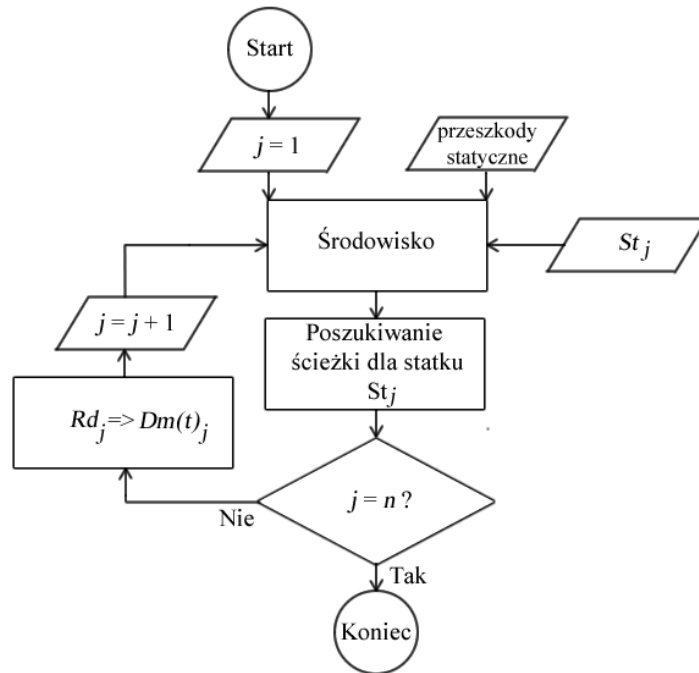
1. Rozpoczęcie poszukiwania bezpiecznej ścieżki przejścia dla statku znajdującego się na najwyższej pozycji w hierarchii ($j=1$) w przestrzeni dopuszczalnej X dla środowiska o wymiarach $a \times b$, w którym znajduje się l ograniczeń statycznych $Stat_k$, gdzie $k = 1, 2, \dots, l$. Przestrzeń ta zdefiniowana jest następująco (Śmierzchalski 1998):

$$X = \{x \in \mathbb{R}^2: a_i \leq x_i \leq b_i \text{ dla } i = 1,2\} \quad (5.3)$$

2. Poszukiwanie ścieżki przejścia Rd_j dla statku St_j o pozycji j w hierarchii.
3. Sprawdzenie, czy znaleziono ścieżki przejść dla wszystkich rozpatrywanych statków ($j = n$). Jeżeli warunek ten jest spełniony, algorytm kończy działanie. W przeciwnym przypadku należy przejść do następnego kroku.
4. Wprowadzenie do środowiska algorytmu hEP/N ograniczenia dynamicznego $Dm(t)_j$ poruszającego się z prędkością v_j w czasie t wzdłuż wyznaczonej ścieżki Rd_j . Następuje powrót do punktu 2 i rozpoczyna się poszukiwanie ścieżki dla kolejnego w hierarchii statku St_j ($j = j + 1$).

Po zakończeniu wyznaczania ścieżek, operatorowi systemu VTS zostaje przedstawione rozwiązanie algorytmu hEP/N, czyli zbiór bezpiecznych ścieżek przejść. Interfejs algorytmu hEP/N umożliwia wizualizację położenia statków w różnych momentach czasu t .

Należy podkreślić, że w algorytmie hEP/N uwzględnia się w sposób ograniczony dynamikę statków, a wyznaczone ścieżki przejść nie stanowią fizycznego odwzorowania ich trajektorii.



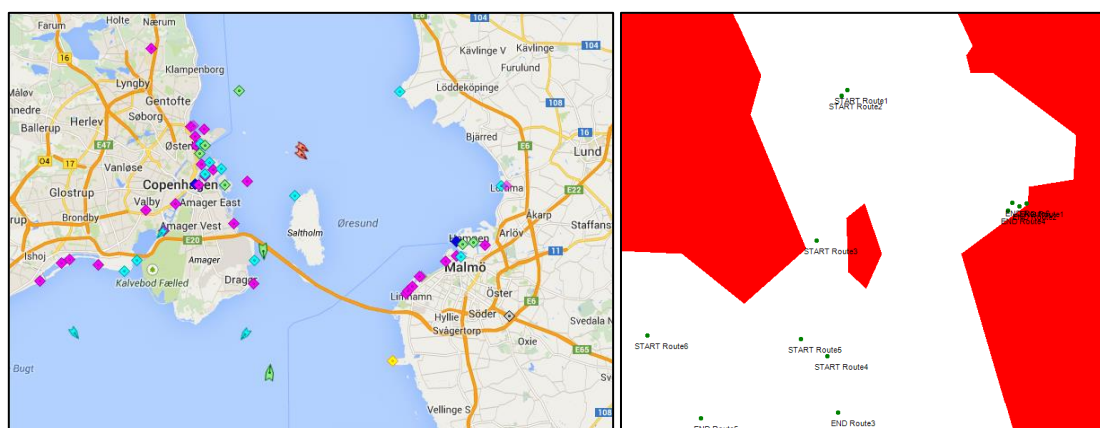
Rysunek 31. Wyznaczanie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść w algorytmie hEP/N. Oznaczenia: St_j - statek, dla którego poszukuje się ścieżki przejścia Rd_j , j - pozycja statku St_j w hierarchii, n - liczba statków w środowisku, $Dm(t)_j$ - Ograniczenie dynamiczne poruszające się z prędkością v_j po ścieżce przejścia Rd_j w czasie t .

W dalszej części rozdziału przedstawiono wybrane aspekty procesu poszukiwania ścieżki przejścia w algorytmie hEP/N. Ze względu na fakt, iż algorytm ten zbudowany jest w oparciu o algorytm Θ EP/N++ opisany w (Śmierzchalski 1998), w pracy przedstawiono wyłącznie najważniejsze lub zmodyfikowane względem algorytmu Θ EP/N++ elementy algorytmu hEP/N.

5.3.1 Odwzorowanie środowiska morskiego w algorytmie hEP/N

Jednym z najważniejszych elementów algorytmu hEP/N jest odwzorowanie środowiska, w którym poszukuje się ścieżek przejść dla statków poruszających się w obserwowanym obszarze. W modelowanym środowisku (Śmierchalski 1997b; Śmierchalski 1997c) zakłada się występowanie ograniczeń statycznych i dynamicznych. Ograniczenia statyczne zamodelowano za pomocą wielokątów. Statki reprezentowane są jako punkt albo wielokąt, w zależności od etapu działania algorytmu. Jednostka, dla której poszukuje się ścieżki, jest przedstawiona jako punkt (co wynika ze stosunku wymiarów jednostki do rozmiarów środowiska). Dla kolejnych w hierarchii statków, ta sama jednostka traktowana jest jako obszar domeny bezpiecznej statku poruszający się wzdłuż wyznaczonej ścieżki przejścia Rd_j z prędkością v_j . Do celów badawczych przyjęto stałe wymiary środowiska: 12 mil morskich szerokości i 6 mil morskich długości.

W algorytmie hEP/N środowisko tworzone jest przez operatora programu. Algorytm pozwala na naniesienie ograniczeń statycznych (czerwony obszar na rysunku 32), pozycji początkowej Dp_j oraz pozycji docelowej Dd_j wybranego statku. Punkty te można ustawić przy pomocy współrzędnych wprowadzanych w dedykowanym oknie lub za pomocą kursora myszki bezpośrednio na wizualizacji środowiska. Możliwe jest również ustawienie prędkości v_j danej jednostki, jej typu oraz statusu nawigacyjnego.



Rysunek 32. Przykładowa sytuacja nawigacyjna w rejonie Kopenhagi (WWW - AIS) i jej odwzorowanie w algorytmie hEP/N.

5.3.2 Poszukiwanie i ocena ścieżek przejść w algorytmie hEP/N

W zadaniu poszukiwania ścieżki należy wyznaczyć ścieżkę przejścia Rd_j , którą statek St_j pokona w jak najkrótszym czasie w sposób bezkolizyjny. Wyznaczenie takiej ścieżki będzie więc kompromisem między zejściem statku z zadanego kursu a bezpieczeństwem ruchu. Ze względu na przeciwstawne kryteria, poszukiwanie ścieżki można traktować jako zadanie wielokryterialnego planowania optymalnej ścieżki przejścia z jednoczesnym uwzględnieniem ekonomiki i bezpieczeństwa ruchu.

Poszukiwana ścieżka przejścia dla statku St_j od jego pozycji początkowej Di_j do pozycji docelowej Dd_j danej jednostki składa się z odcinków s_i ($i = 1, \dots, z$; z – liczba punktów zwrotu) połączonych w punktach zwrotu (x_i, y_i) . Ścieżka przejścia wyznaczana jest wykorzystując metodę ewolucyjną. Założono, że ścieżkę przejścia reprezentuje pojedynczy osobnik populacji – ścieżka przejścia Rd (Śmierzchalski 1997). Każdy z tych osobników składa się z genów – punktów zwrotu o współrzędnych (x_i, y_i) . Rozmiar populacji określa się w algorytmie hEP/N. Każdy osobnik oprócz informacji o współrzędnych poszczególnych punktów zwrotu zawiera również dane o wartości prędkości v_i na danym odcinku. Inne przechowywane informacje to dane czy następny odcinek ścieżki przejścia Rd jest bezpieczny i czy określony punkt zwrotu nie należy do obszaru zakazanego (Śmierzchalski 1998). Populacja początkowa wyznaczana jest stochastycznie. Wszystkie osobniki takiej populacji zawierają losową liczbę genów, a te stochastycznie dobrane współrzędne punktów zwrotu (x_i, y_i) oraz informację o prędkości v na danym odcinku. Zgodnie z zasadą działania algorytmów ewolucyjnych, osobniki podlegają działaniu operatorów genetycznych.

Zakłada się, że ścieżka przejścia Rd jest ścieżką bezpieczną w przestrzeni dopuszczalnej X wtedy, gdy żaden z jej odcinków s_i nie przecina ograniczeń statycznych $Stat_k$ i w chwilach czasu t zdeteminowanych położeniem statku, dla którego wyznaczana jest ścieżka Rd_j , nie osiąga poruszających się domen bezpiecznych ograniczeń dynamicznych $Dm(t)_m$, gdzie $m = 1, 2, \dots, j-1$. Ścieżki bezpieczne będą znajdować się w przestrzeni bezpiecznej Y_j . Przestrzeń ta spełnia następujące równanie (Śmierzchalski 1998):

$$Y_j = X - \bigcup_{k=1}^l Stat_k - \bigcup_{l=1}^{j-1} Dm(t)_m \quad (5.4)$$

Ważną konsekwencją tak zdefiniowanej przestrzeni stanowi fakt, że nie jest ona tożsama dla wszystkich statków. Każde poszukiwanie ścieżki jest przeprowadzone w unikalnej przestrzeni bezpiecznej Y_j . Zmienna j determinuje liczbę ograniczeń dynamicznych w przestrzeni bezpiecznej Y_j .

Zbiór ścieżek przejść Rd należących do przestrzeni dopuszczalnej X stanowi zbiór ścieżek bezpiecznych Rd_safe_j (Śmierzchalski 1998) wówczas, gdy żadna ścieżka nie przecina obszaru przeszkód statycznych dla statku o pozycji $j = 1$ w hierarchii lub obszaru przeszkód statycznych oraz domen bezpiecznych ograniczeń dynamicznych dla statków o pozycji $j > 1$ w hierarchii:

$$Rd_safe_j \cap \bigcup_{k=1}^l Stat_k = 0, \text{ dla } j = 1 \quad (5.5)$$

$$Rd_safe_j \cap \left(\bigcup_{k=1}^l Stat_k \cup \bigcup_{m=1}^{j-1} Dm(t)_m \right) = 0 \text{ dla } j > 1 \quad (5.6)$$

Ścieżki przejść przecinające obszary zakazane tworzone przez ograniczenia statyczne i dynamiczne nazywane są ścieżkami niebezpiecznymi.

Algorytm hEP/N wyznacza optymalne lub zbliżone do optymalnych ścieżki przejść dla wszystkich jednostek w obserwowanym środowisku. Pozwala to na rozwiązanie zadania zachowania bezpieczeństwa na całym obszarze o dużym natężeniu ruchu poprzez optymalizację kosztu poszczególnych ścieżek. Oznacza to również, że wyznaczone rozwiązanie będzie wpływać na poprawę bezpieczeństwa i ekonomiki podróży wszystkich jednostek znajdujących się w obserwowanym środowisku. Dążyć się będzie zatem do minimalizacji tych kosztów:

$$\min(Global_Cost) = \min \sum_{j=1}^n Total_Cost_j \quad (5.7)$$

gdzie: *Global_Cost* – sumaryczny koszt ścieżek przejść, *Total_Cost_j* - Koszt ścieżki przejścia *Rd_j*.

Wszystkie ścieżki przejść są oceniane przez funkcję przystosowania. Funkcja ta, w algorytmie hEP/N, uwzględnia zarówno warunki ekonomiczne związane ze zmianą kursu statku jak i warunki bezpieczeństwa żeglugi. Te ostatnie będą spełnione, jeżeli ścieżka przejścia nie przekroczy obszaru domeny bezpiecznej jednostki, której ustępuje drogi, oraz nie naruszy obszaru ograniczeń statycznych. Ścieżka taka jest ścieżką bezpieczną. Funkcja przystosowania przyjmuje dwie postacie: funkcję przystosowania dla ścieżek bezpiecznych i niebezpiecznych. Dla ścieżek niebezpiecznych analizuje się liczbę przekroczonych ograniczeń oraz zakres penetracji (Śmierzchalski 1998). W wypadku ścieżek bezpiecznych wielkością określającą całkowity koszt ścieżki przejścia uwzględniający zarówno warunki bezpieczeństwa *Safe_Cost(Rd)*, jak i ekonomikę ruchu *Econ_Cost(Rd)* statku poruszającego się wzdłuż tej ścieżki (Śmierzchalski 1993), definiuje się jako:

$$Total_Cost(Rd) = Safe_Cost(Rd) + Econ_Cost(Rd) \quad (5.8)$$

Warunki bezpieczeństwa są spełnione, jeśli ścieżka przejścia nie przekroczy ograniczeń statycznych i poruszających się obszarów domen bezpiecznych ograniczeń dynamicznych. Koszt *Safe_Cost(Rd)*, związany z bezpieczeństwem, określa się jako maksymalną wartość definiującą jakość punktów zwrotu pod względem odległości od ograniczeń (Śmierzchalski 1993; Xiao 1997):

$$Safe_Cost(Rd) = w_c * clear(Rd) \quad (5.9)$$

gdzie $clear(Rd) = \max_{i=1}^{z-1} \{c_i\}$, c_i oznacza różnicę między odległością punktu zwrotu najbliższego leżącego od ograniczenia a wartością założoną d . Parametr w_c to współczynnik wagi.

Na koszt ścieżki związany z warunkami ekonomicznymi $Econ_Cost(Rd)$ składają się wartości:

- Całkowitej długości ścieżki przejścia Rd złożonej z z odcinków s_i (Śmierzchalski 1993; Xiao 1997):

$$dist(Rd) = \sum_{i=1}^{z-1} dist(s_i) \quad (5.10)$$

- Funkcji maksymalnego kąta zwrotu pomiędzy poszczególnymi odcinkami s_i ścieżki przejścia Rd w punktach zwrotu:

$$smooth(Rd) = \max_{i=2}^{z-1} \{smooth_{ind}(s_i)\} \quad (5.11)$$

- Czasu potrzebnego do przebycia ścieżki przejścia Rd :

$$time(Rd) = \sum_{i=1}^{z-1} time(s_i) \quad (5.12)$$

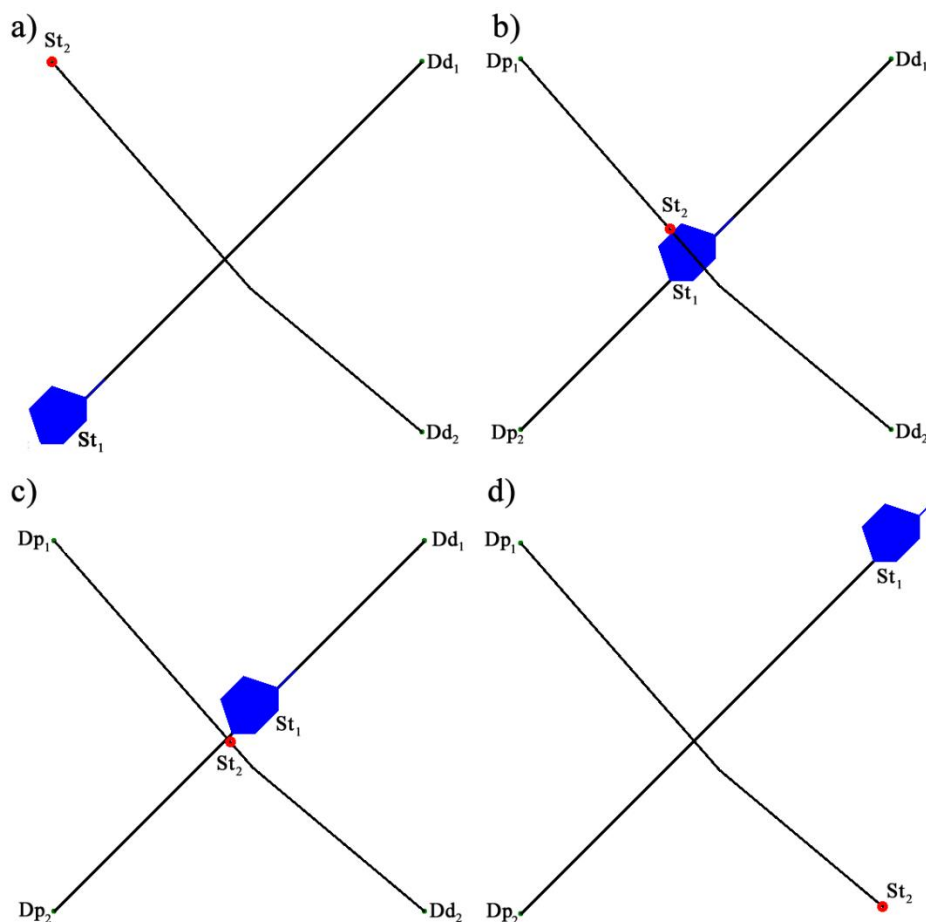
Całkowity koszt przystosowania ścieżki przejścia do środowiska wynikający z warunków ekonomicznych wyraża się równaniem:

$$Econ_Cost(Rd) = w_d * dist(Rd) + w_s * smooth(Rd) + w_t * time(Rd) \quad (5.13)$$

gdzie: w_d , w_s i w_t to współczynniki wagi.

5.3.3.1 Wykrywanie kolizji w algorytmie hEP/N

W algorytmie hEP/N założono, że należy podjąć możliwie jak najwcześniej działania pozwalające na uniknięcie kolizji, tym samym redukując zakres wymaganej zmiany kursu. Manewry unikania kolizji powinny rozpocząć się, gdy dwa obiekty wchodzi w zakres obserwacji (5-8 mil morskich przed dziobem i 2-4 mili za rufą statku) (Burger 1983). Obiekt, który znajduje się wyżej w hierarchii względem innych statków, posiada domenę bezpieczną, której inne statki nie mogą naruszać. Jednostki te ustępują drogi, by uniknąć kolizji (rysunek 33).



Rysunek 33. Przebieg przykładowej symulacji w algorytmie hEP/N. Statek St₂ reprezentowany jest jako punkt (kolor czerwony). Obiekt St₁, znajdujący się wyżej w hierarchii, przedstawiony jako obszar domeny bezpiecznej tego obiektu (kolor niebieski) a) w chwili rozpoczęcia symulacji, b) w punkcie największego zbliżenia, c) po wyminięciu się jednostek, d) w chwili zakończenia symulacji. Obie jednostki poruszają się z identyczną prędkością.

Aby przestrzegać prawideł COLREG, podczas konstruowania domeny bezpiecznej przyjęto następujące założenia (Śmierchalski 1998):

- należy maksymalizować rozmiary sześciokąta domeny bezpiecznej na lewej burcie obiektu. W rezultacie manewr statku ustępującego drogi zostanie wyznaczony w bezpiecznej odległości.
- dystans ten musi być większy lub równy odległości, na jakiej mijany obiekt może rozpocząć manewry według prawidła 17 COLREG.

Znaczne rozszerzenie obszaru domeny bezpiecznej w kierunku dziobowym powoduje wymuszenie przejścia za rufą (prawidło 15 COLREG) a nie przed dziobem statku z pierwszeństwem drogi.

Taki kształt domeny bezpiecznej uwzględnienia obowiązku wczesnego manewru statku mającego ustąpić drogi (prawidła 8 i 16 COLREG) i obowiązku zachowania kursu oraz prędkości przez statek posiadający pierwszeństwo drogi (prawidło 17a COLREG). Odległość manewru przy spotkaniach z najbardziej niekorzystnych kątów kursowych 10-30° z lewej burty powinna wynosić co najmniej 2 mile morskie. Lewą oraz rufową część domeny bezpiecznej do kąta 112.5° prawej burty należy opisać na odległościach manewru dozwolonego prawidłem 17 COLREG, obliczonego dla obiektu, a jej część od kąta kursowego 000-112.5° prawej burty – na krzywych odległości manewru statku z pierwszeństwem drogi. Przyjęta koncepcja wyznaczania domen bezpiecznych wokół tych jednostek pozwala uwzględnić te obiekty w postaci ograniczeń dynamicznych w algorytmie hEP/N (Śmierzchalski 1998).

Zadanie wykrycia kolizji w algorytmie hEP/N wykonywane jest poprzez sprawdzenie, czy jakikolwiek odcinek danego osobnika Rd przecina się z dowolnym odcinkiem ścieżki przejścia Rd_j . Sytuacja ta będzie mieć miejsce, gdy w przestrzeni dopuszczalnej X będzie istniał punkt o współrzędnych x, y wspólny dla obu ścieżek przejść:

$$\bigvee_{(x,y) \in X} (x,y) = Rd \cap Rd_j \quad (5.14)$$

Jeżeli punkt wspólny zostanie znaleziony, algorytm hEP/N sprawdza czy istnieje taka chwila czasu t , w której statek $Rd(t)$ narusza domenę bezpieczną ograniczenia dynamicznego. Ścieżka przejścia Rd będzie zatem kolizyjna z domeną bezpieczną ograniczenia dynamicznego $Dm(t)$, jeżeli istnieje taki moment czasu t , w którym pozycja statku $Rd(t)$ poruszającego się po ścieżce Rd , zawiera się w obszarze domeny bezpiecznej ograniczenia dynamicznego $Dm(t)$:

$$\bigvee_t Rd(t) \in Dm(t) \quad (5.15)$$

Analogicznie wykrywane są kolizje z dowolnym obszarem ograniczenia statycznego $Stat$:

$$\bigvee_t Rd(t) \in Stat \quad (5.16)$$

gdzie poszukuje się chwili czasu t , w której pozycja statku, dla którego poszukuje się ścieżki przejścia, zawiera się w obszarze ograniczenia statycznego $Stat$.

5.3.3 Modyfikacje algorytmów ewolucyjnych wykorzystane w algorytmie hEP/N.

Algorytm hEP/N korzysta z biblioteki GALib (Wall 1996), która zawiera liczne możliwości konfiguracji algorytmów ewolucyjnych. Jak wynika z rozdziału 4, różne modyfikacje algorytmów ewolucyjnych pozwalają osiągać lepsze wyniki rozwiązań końcowych w porównaniu do klasycznego algorytmu ewolucyjnego. Może się to jednak wiązać z wydłużeniem czasu obliczeń. Algorytm hEP/N pozwala konfigurować następujące elementy, które zostały opisane w rozdziale 4:

1. Typ algorytmu:

- a) StedyStateGA (klasyczny algorytm ewolucyjny) – z możliwością ustawiania liczby zastępowań osobników. Jest to opcja, która wymaga najkrótszego czasu obliczeń i osiąga oczekiwaną jakość rozwiązań dla podstawowych sytuacji kolizyjnych. Przez jakość rozwiązań należy rozumieć zbiór ścieżek o jak najniższej wartości sumarycznego kosztu ścieżek przejść *Global_Cost*,
- b) IncrementalGA (algorytm inkrementacyjny) – z możliwością ustalenia ilości faz inkrementacyjnych (jedna/dwie) oraz metody wymiany osobników. Ten tryb algorytmu cechował się najmniej korzystną jakością rozwiązań,
- c) DemeGA (algorytm wielopopulacyjny) – z możliwością ustalenia ilości wymian osobników, ilości populacji oraz liczby osobników biorących udział w migracji. Opcja ta wykazuje najdłuższy czas obliczeń, ale również wyznacza rozwiązania o najwyższej wartości przystosowania porównaniu do pozostałych trzech typów algorytmu.

2. Skalowanie:

- a) liniowe,
- b) odcinające typu sigma,
- c) potęgowe,
- d) wyłączone,

3. Metoda selekcji:

- a) selekcja rankingowa,
- b) selekcja turniejowa,
- c) selekcja typu „DS”,
- d) selekcja typu „ruletka”,
- e) selekcja typu „SRS”.

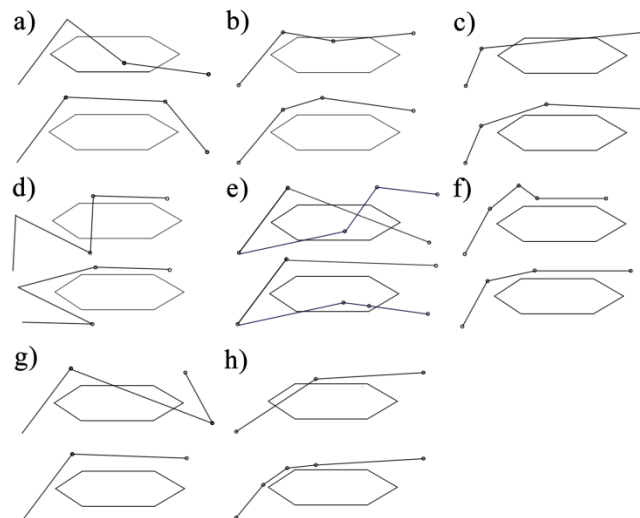
4. Ogólne ustawienia algorytmu:

- a) maksymalna liczba punktów zwrotu,
- b) minimalna liczba punktów zwrotu,
- c) rozmiar populacji,
- d) prawdopodobieństwo krzyżowania,
- e) prawdopodobieństwo mutacji,
- f) współczynnik maksymalnego kąta zwrotu między odcinkami,
- g) współczynnik maksymalnej penetracji domeny bezpiecznej obiektu.

Algorytm hEP/N korzysta z następujących operatorów genetycznych, które zostały opisane w pracy (Śmierzchalski 1998):

- a) mutacja,
- b) mutacja miękka,
- c) dodanie genu,
- d) zamiana pozycji genów,
- e) krzyżowanie,
- f) wygładzanie,
- g) usunięcie genu,
- h) reperacja osobnika.

Działanie tych operatorów przedstawiono na rysunku 34.



Rysunek 34. Modyfikacje ścieżki za pomocą operatorów genetycznych: a) mutacja, b) mutacja miękka, c) dodawanie genu, d) zmiana pozycji genu, e) krzyżowanie, f) wygładzanie, g) usuwanie genu, h) reperacja osobnika.

5.3 Realizacja wyznaczonego zbioru bezpiecznych ścieżek przejść

Wynikiem działania algorytmu hEP/N jest zbiór bezpiecznych ścieżek przejść dla statków znajdujących się w obserwowanym środowisku. Wyznaczone ścieżki przejść pozwalają operatorowi systemu VTS koordynować ruch tych jednostek w sposób bezpieczny. Rozwiązanie algorytmu hEP/N będzie odświeżane w zależności od czasu jego działania i częstotliwości aktualizacji danych wejściowych. Częstotliwości te dla systemu AIS zostały przedstawione w rozdziale 9.5.4 i różnią się w zależności od obserwowanego parametru. Dane dynamiczne (pozycja początkowa Dp_j , prędkość v_j , kurs ψ_j) odświeżane są co 10 sekund. Jest to czas krótszy niż średni czas działania algorytmu hEP/N dla przedstawionych w rozdziale badań sytuacji nawigacyjnych. Dzięki temu możliwa jest ciągła obserwacja i działanie metody w oparciu o aktualne dane.

Aktualizowanie informacji dostępnych w systemie AIS, z którego mogą pochodzić dane wejściowe, w czasie zbliżonym do rzeczywistego umożliwia operatorowi systemu VTS nadzorować realizację wcześniej wyznaczonego rozwiązania. Operator ten może zatem zareagować w przypadku nieprawidłowości. Struktura algorytmu uniemożliwia jednocześnie sytuację, w której poruszanie się wzdłuż wyznaczonej ścieżki przejścia powoduje ryzyko zderzenia z innym obiektem. Podczas poszukiwania ścieżki uwzględnia się bowiem ryzyko kolizji z każdym potencjalnie niebezpiecznym obiektem od pozycji początkowej Dp_j do pozycji docelowej Dd_j danego statku St_j .

Realizację wyznaczonego zbioru bezpiecznych ścieżek przejść można podzielić na trzy etapy:

1. Przesłanie informacji o wyznaczonej ścieżce przejścia statku decydentowi przez operatora systemu VTS. Informacja ta przesyłana jest z wykorzystaniem radia lub metod elektronicznych.
2. Sterowanie statkiem wzdłuż wyznaczonej przez algorytm hEP/N ścieżki przejścia z zadaną prędkością przez decydenta.
3. Nadzorowanie przez operatora systemu VTS wykonywania zalecanego manewru.

Ograniczeniem hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść jest maksymalna liczba decydentów, z którymi operator systemu VTS może komunikować się jednocześnie. Uniknięcie pojedynczej sytuacji kolizyjnej wymagającej koordynacji ruchu dwóch statków jest zadaniem wykonalnym. Gdy jednak liczba ta wzrasta, pojawia się ryzyko utrudnionej komunikacji między operatorem systemu VTS a decydentami wszystkich zagrożonych jednostek. W rozdziale 7 proponuje się rozwiązanie tego problemu.

5.4 Porównanie hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść z metodą ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii statków

Dotychczas zaprezentowano strukturę i zasady działania hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść. Istnieje jednak metoda do niej zbliżona, czyli metoda ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii statków (Szałpczyński 2009; Szałpczyński 2012a; Szałpczyński 2012b), którą opisano w rozdziale 4.5. W bieżącym podrozdziale przedstawiono porównanie obu metod, wykazując oryginalność hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść.

Obie metody zajmują się wyznaczaniem zbioru ścieżek przejść z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego. Warto podkreślić, że metoda ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii statków wyznacza zbiór ścieżek przejść w rozumieniu nazewnictwa wykorzystywanego w hierarchicznej ewolucyjnej metodzie wyznaczania ścieżek przejść. W tabeli 1 przedstawiono porównanie obu metod. W rozdziale 6.9 podjęto próbę zestawienia rozwiązań wyznaczanych przez metodę ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii statków oraz tych otrzymanych z wykorzystaniem hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść. Posłużono się w tym celu badaniami przedstawionymi w (Szałpczyński 2012b).

Metoda ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii statków charakteryzuje się strukturą funkcji przystosowaną oceniającą przestrzeganie prawideł COLREG oraz czasem działania poniżej jednej minuty. Hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść również została opracowana w sposób, który wyżej ocenia rozwiązania zgodne z tymi prawidłami. Operator algorytmu hEP/N posiada również możliwość wyznaczenia ścieżek niezgodnych z prawidłami COLREG. Czas wyznaczenia rozwiązania w obu przypadkach jest zbliżony do rzeczywistego. Należy jednak podkreślić, że w specyficznych warunkach (duża liczba sytuacji zagrożenia kolizją) hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść będzie wymagać czasu większego niż jedna minuta, by przedstawić rozwiązanie zadanej sytuacji nawigacyjnej. Na korzyść tej metody należy wskazać jej uniwersalność, zarówno w kontekście wykorzystywania większej ilości narzędzi ewolucyjnych jak i łatwości implementacji nowych modyfikacji. Zaletą jest również możliwość wyznaczania ścieżek przejść w sytuacjach awaryjnych (wymienionych w rozdziale 5.2.5), kiedy to należy zastosować prawo 2 COLREG. W hierarchicznej ewolucyjnej metodzie wyznaczania ścieżek przejść jest to możliwe poprzez modyfikację hierarchii przez operatora systemu VTS.

Obie metody proponują pozyskanie danych wejściowych z systemu AIS, jednak w pracach (Szałpczyński 2009; Szałpczyński 2012a; Szałpczyński 2012b) nie opisano tego zagadnienia. W niniejszej pracy przeprowadzono analizę możliwości systemu AIS.

Tabela 1 – Porównanie hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek statków przejść oraz metody ewolucyjnego zbioru bezpiecznych trajektorii statków (Szlapczyński 2009).

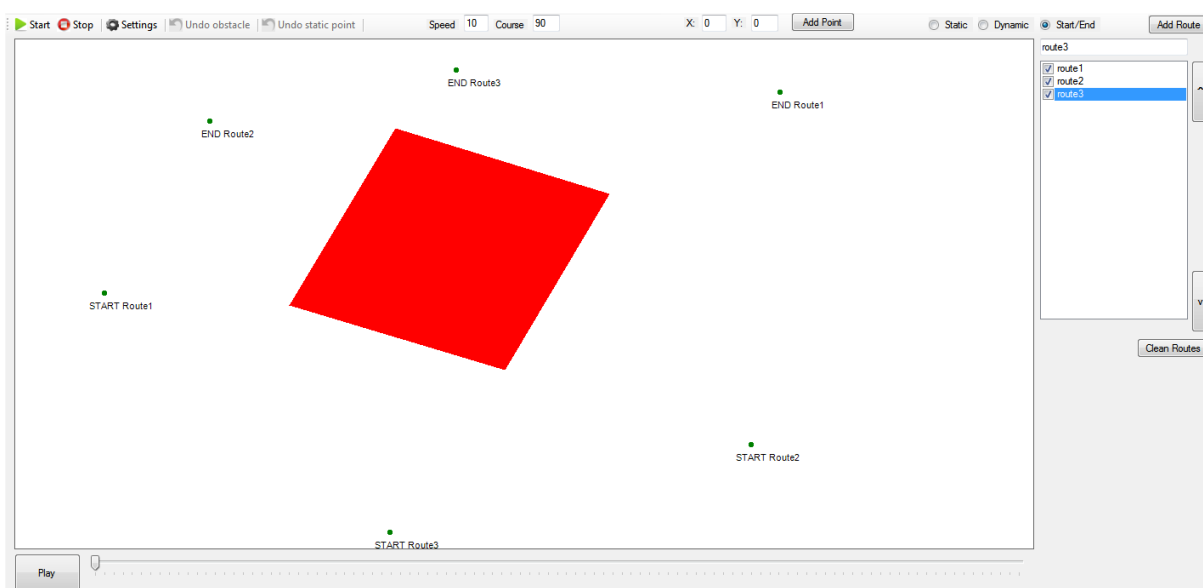
	hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść	metoda ewolucyjnego zbioru bezpiecznych trajektorii statków
Struktura algorytmu ewolucyjnego	Algorytm działa jak klasyczny algorytm ewolucyjny na poziomie poszukiwania ścieżki. Schemat wyznaczania ścieżek przejść zmodyfikowano, by uwzględnić aktualizowanie środowiska o nowe ograniczenia dynamiczne.	Algorytm działa na podstawie zmodyfikowanej struktury klasycznego algorytmu ewolucyjnego, która pozwala na pozyskanie wartości przystosowania w momencie użycia wyspecjalizowanych operatorów genetycznych.
Operatory genetyczne	Algorytm używa klasycznych operatorów genetycznych poprzez wykorzystanie bibliotek GALib. Jest możliwa szybka rozbudowa o nowe modyfikacje.	Algorytm korzysta ze specjalizowanych operatorów przygotowanych na potrzeby metody. Ich liczba jest ograniczona a adaptacja nowych narzędzi wymaga ich dopasowania do struktury algorytmu ewolucyjnego.
Osobnik	Osobnik populacji reprezentuje pojedynczą ścieżkę przejścia statku.	Osobnik reprezentuje zbiór bezpiecznych ścieżek przejść.
Czas działania	Silnie zależny od liczby sytuacji zagrożenia kolizją oraz wybranego typu algorytmu. W badaniach wyznaczenie ścieżek trwało od 2 sekund do ok. minuty (średnia dla 9 różnych scenariuszy testowych: 21 sekund).	Nie większy jak 1 minuta.
Sposób wyznaczenia zbioru bezpiecznych ścieżek przejść	Wykorzystanie hierarchii.	Wykorzystanie wyspecjalizowanych operatorów genetycznych.
Sposób aplikacji prawideł COLREG	Mechanizm hierarchii oraz kształt domeny bezpiecznej pozwala wyznaczyć ścieżki zgodne z prawidłami COLREG.	Funkcja przystosowania, która analizuje wzajemne relacje dwóch statków i penalizuje ścieżki przejść niezgodne z prawidłami COLREG.
Sposób wyznaczania ścieżek w sytuacji awaryjnej	Zmiana hierarchii przez operatora systemu VTS	Brak wsparcia dla rozwiązań z pominięciem prawideł COLREG.
Źródło danych	System AIS	System AIS i/lub ARPA
Aplikacja	System VTS	System VTS

6 Badania

6.1 Środowisko oraz metodyka badań

Aby zweryfikować możliwości opracowanego algorytmu hEP/N, przygotowano 9 scenariuszy testowych. Sześć z nich stanowi różne sytuacje kolizyjne na morzu, dwa pozostałe to symulacje działania algorytmu hEP/N w warunkach rzeczywistych. W ostatnim scenariuszu testowym dokonano próby porównania rozwiązań otrzymanych z wykorzystaniem algorytmu hEP/N z rozwiązaniami otrzymanymi metodą ewolucyjnego zbioru bezpiecznych trajektorii (Szłapczyński 2009).

W badaniach, gdzie było to uzasadnione, rozważano różne hierarchie jednostek danego środowiska. Pozwoliło to wyznaczyć rozwiązania zgodne, jak i niezgodne z prawidłami COLREG. Symulacje zostały przeprowadzone dla różnych parametrów algorytmu w środowisku odpowiadającym obszarowi rzeczywistemu o szerokości 12 i długości 6 mil morskich (rysunek 35). Każdemu obiektowi, dla którego będzie wyznaczana ścieżka przejścia, przypisuje się punkt początkowy, punkt końcowy, prędkość, typ jednostki oraz status nawigacyjny. W przypadku trudności w znalezieniu rozwiązania lub chęci powtórzenia wyznaczania ścieżek, interfejs pozwala przyspieszyć wyznaczanie wyników poprzez wyłączenie z tego procesu dowolnych statków (np. statków niezagrażonych kolizją).



Rysunek 35 – Przykładowe środowisko badań dla 3 statków z przeszkodą statyczną usytuowaną w centrum środowiska.

Badania poszczególnych scenariuszy zostały podzielone na dwa etapy:

1. badanie wstępne,
2. badanie właściwe.

Wyniki badań wstępnych nie zostały opublikowane w pracy. Ich przeprowadzenie umożliwiło wyznaczenie zestawu parametrów algorytmu hEP/N, który pozwalał na wyznaczenie możliwie najlepszego zbioru bezpiecznych ścieżek przejść dla danego scenariusza testowego w jak najkrótszym czasie. Poszukiwania optymalnego zestawu parametrów algorytmu hEP/N prowadzone były drogą

empiryczną. Modyfikowano jedynie wybrane parametry z tych przedstawionych w rozdziale 5.3.3. W każdym badanym scenariuszu uwzględniono wartości modyfikowanych parametrów.

Badania właściwe obejmowały analizę:

1. wartości końcowej przystosowania dla danego statku,
2. wartości końcowej sumy wartości przystosowania wszystkich znajdujących się w środowisku statków,
3. czasu obliczeń,
4. oceny przebiegu wyznaczonych ścieżek przejść,
5. poprawności wyznaczonej hierarchii.

Pierwsze dwa parametry pozwalają na porównanie otrzymanych rozwiązań danego scenariusza testowego. Czas obliczeń pozwala określić, czy rozwiązanie zostało wyznaczone w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Ważny jest również przebieg wyznaczonych ścieżek przejść, który pozwala stwierdzić, czy daną ścieżkę przejścia można uznać za optymalną lub zbliżoną do optymalnej. Badano również poprawność hierarchii statków wyznaczoną przez algorytm hEP/N. W uzasadnionych przypadkach, niektóre z tych parametrów były pomijane. Opis każdego scenariusza testowego obejmuje listę analizowanych parametrów.

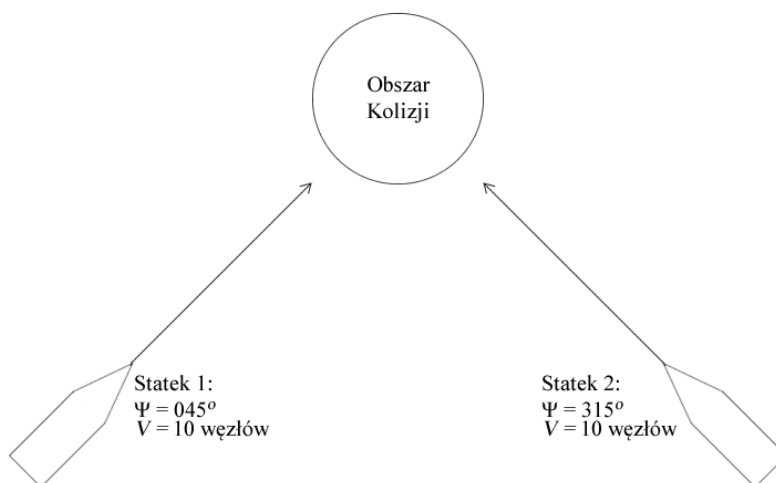
Interfejs algorytmu hEP/N pozwala również obserwować, przy pomocy dedykowanego „suwaka”, położenie statków w różnych momentach czasu symulacji. Pozycja jednostek wyznaczana jest co 1,5 minuty czasu rzeczywistego. W trakcie wizualizacji można zaznaczyć jednostkę, dla której algorytm wyświetli jej domenę bezpieczną. Przy pomocy programu graficznego naniesiono również symboliczne obrysy statków, które nie mają na danym rysunku przedstawionych swoich domen bezpiecznych. Obrysy te nie są związane z faktycznymi wymiarami statków. Mają one na celu pomóc czytelnikowi zrozumieć przedstawione sytuacje nawigacyjne.

Wartości końcowe przystosowania dla danego statku podane w tabelach poniżej, jak również badany czas symulacji, są wartościami uśrednionymi z 20 powtórzeń danej symulacji. W pracy przedstawiono najlepsze otrzymane rozwiązania.

Testy przeprowadzono na komputerze z procesorem Intel Core i5 650 o częstotliwości taktowania procesora 3.20 GHz oraz z 8 gigabajtami pamięci RAM na 64-bitowej wersji systemu operacyjnego Windows 7.

6.2 Sytuacja kolizyjna dwóch statków na kursie przecinającym – scenariusz testowy I

W pierwszym scenariuszu testowym dwie jednostki znalazły się na kursie kolizyjnym (rysunek 36). Obie poruszają się z taką samą prędkością i są jednakowo oddalone od punktu PPC. Statek 1 porusza się kursem 045° , a statek 2 kursem 315° . W przypadku braku reakcji obu jednostek, tory optymalne spowodowałyby kolizję. Przypadek ten jest często spotykanym scenariuszem kolizji na morzu.



Rysunek 36 – Scenariusz testowy I: sytuacja kolizyjna dwóch statków na kursie przecinającym. Obie jednostki poruszają się z taką samą prędkością i są jednakowo oddalone od punktu potencjalnej kolizji. Statek 1 porusza się kursem 045° , statek 2 kursem 315° .

Jednym z przykładowych wypadków, które odwzorowuje przedstawiony scenariusz testowy, jest kolizja statku Gdynia ze jednostką Fu Shan Hai (WWW – DIM)². Podobnie jak w przypadku większości tego typu wypadków na morzu, główną przyczynę zderzenia stanowił błąd człowieka. Według przepisów COLREG to statek Gdynia powinien ustąpić drogi jednostce Fu Shan Hai.

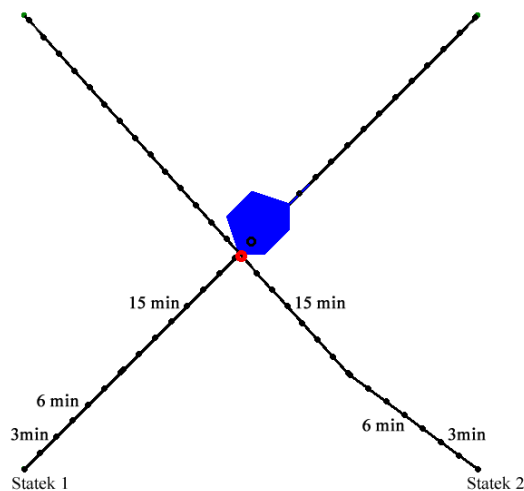
Algorytm poprawnie wyznaczył hierarchię dla przedstawionej sytuacji nawigacyjnej. Dla potrzeb badań rozpatrzono również przypadek, gdy to statek Gdynia posiada pierwszeństwo drogi względem jednostki Fu Shan Hai (np. z powodu braku komunikacji i jakiegokolwiek akcji ze strony tej jednostki). W pierwszym przypadku statek 1 poruszający się kursem 045° ustępuje drogi drugiej jednostce (rysunek 37). W przypadku drugim to statek 2 poruszający się kursem 315° ustępuje drogi (rysunek 38).

² Kolizja miała miejsce na północ od Bornholmu podczas dobrej pogody i widzialności. Oba statki płynęły przecinającymi się kursami: Jednostka Gdynia płynęła kursem z lewej burty statku Fu Shan Hai – powinna więc ustąpić drogi zgodnie z przepisami COLREG. Na mostku jednostki Gdynia wachtę pełnił tylko II oficer, który wykorzystując system antykolizyjny ARPA, źle ocenił sytuację – manewr został wykonany za późno i statek Gdynia uderzył pod kątem prostym dziobem w lewą burtę jednostki Fu Shan Hai. Statek ten w rezultacie kolizji zatonął i jest obecnie największą jednostką, która spoczywa na dnie Bałtyku (Błus 2004).

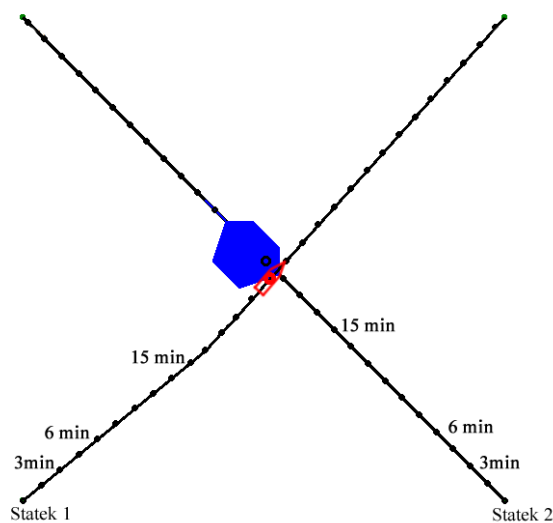
Badanie przeprowadzono dla następujących parametrów:

- tryb algorytmu: klasyczny,
- zakończenie poszukiwania ścieżki: warunek maksymalnej liczby pokoleń: 400,
- liczba osobników w populacji: 30,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0.8,
- selekcja: ruletkowa,
- skalowanie: wyłączone,
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.15.

Powyższe parametry pozwalają osiągnąć wyniki w czasie zbliżonych do rzeczywistego dla każdego przypadku środowiska z niewielką liczbą jednostek oraz brakiem przeszkód statycznych.



Rysunek 37 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego I – przypadek 1: statek 2 ustępuje drogi statkowi 1 i wymija go za jego rufą zgodnie z prawidłami COLREG. Rysunek przedstawia położenie jednostek w momencie maksymalnego zbliżenia ok. 21 minuty scenariusza.



Rysunek 38 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego I – przypadek 2: statek 1 ustępuje drogi statkowi 2 i wymija go za jego rufą zgodnie z prawidłami COLREG. Rysunek przedstawia położenie jednostek w momencie maksymalnego zbliżenia ok. 21 minuty scenariusza.

Tabela 2 – Wyniki badań dla scenariusza testowego I.

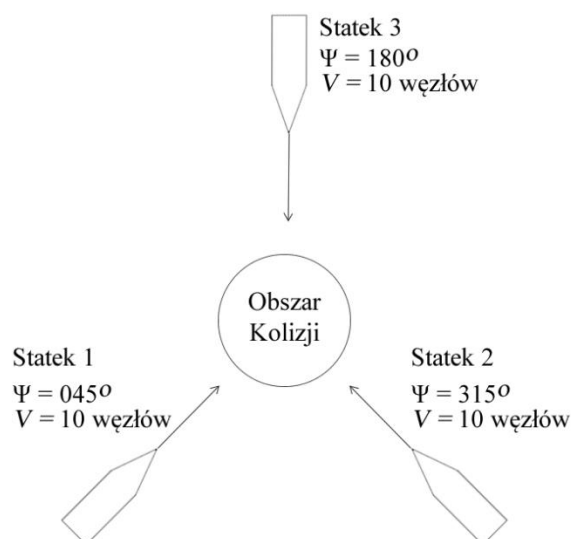
Przypadek	Średnia wartość przystosowania	
	Statek 1	Statek 2
1	76,83	196,06
2	203,83	76,83

Algorytm hEP/N w obu przypadkach wyznaczył ścieżkę optymalną dla statku z pierwszeństwem drogi (rysunek 38; rysunek 39). Analizując tabelę 2, można zaobserwować, że statek ustępujący drogi miał znacząco wyższą wartość przystosowania względem drugiej jednostki mimo minimalnej zmiany kursu. Czas wyznaczania ścieżek wynosił poniżej 4 sekund.

Warto zauważyć, że o ile wartości przystosowania dla statków ustępujących drogi różnią się nieznacznie ze względu na probabilistyczną naturę algorytmów ewolucyjnych, ścieżka optymalna dla jednostek z pierwszeństwem drogi dla obu przypadków osiągnął identyczną wartość.

6.3 Kolizja trzech statków – scenariusz testowy II

W drugim scenariuszu testowym zbadano przypadek potencjalnej kolizji trzech statków (rysunek 39). W analizowanej sytuacji trzy jednostki znajdują się na kursie kolizyjnym. Każda z nich porusza się z tą samą prędkością i jest jednakowo oddalona od punktu potencjalnej kolizji. Statek 1 porusza się kursem 045°, statek 2 kursem 315°, natomiast statek 3 kursem 180°.



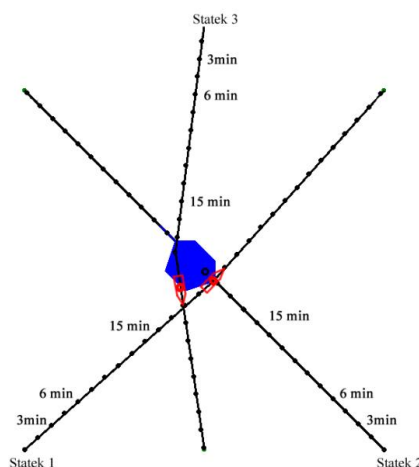
Rysunek 39 – Scenariusz testowy II: kolizja trzech statków. Wszystkie jednostki poruszają się z tą samą prędkością i są jednakowo oddalone od punktu potencjalnej kolizji. Statek 1 porusza się kursem 045°, statek 2 kursem 315°, natomiast statek 3 kursem 180°.

Badanie przeprowadzono dla następujących parametrów:

- tryb algorytmu: klasyczny,
- zakończenie poszukiwania ścieżki: warunek maksymalnej liczby pokoleń: 500,
- liczba osobników w populacji: 30,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0.8,
- selekcja: ruletkowa,
- skalowanie: wyłączone,
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.15.

Przedstawiony scenariusz nie może zostać rozwiązany w oparciu o przepisy COLREG, ponieważ każda z jednostek ma inny statek po swojej prawej burcie i teoretycznie powinna ustąpić drogi. W przypadku rzeczywistego wystąpienia takiej sytuacji wszystkie jednostki powinny wykonać zwrot na prawą burtę aż do momentu, gdy ryzyko kolizji zostanie wyeliminowane (Rymarz 2004). Wykorzystując algorytm hEP/N, możliwe jest wyznaczenie bezpiecznych ścieżek przejść, które wymagać będą jedynie minimalnej zmiany kursu przez statki ustępującym drogi. Dla tak przedstawianej sytuacji nawigacyjnej nie jest możliwe wyznaczenie hierarchii przez algorytm, co zostało omówione w rozdziale 5.2.4. Rozpatrzono więc różne przypadki rozwiązania tego scenariusza.

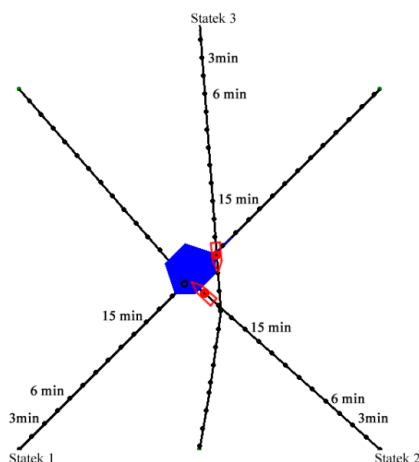
W pierwszym badaniu statki 1 i 3 ustępują drogi statkowi 2, a statek 3 ustępuje drogi pozostałym jednostkom.



Rysunek 40 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego II – przypadek 1: statek 1 i 3 ustępują drogi statkowi 2, a statek 3 ustępuje drogi pozostałym jednostkom. Rysunek przedstawia położenie jednostek w momencie maksymalnego zbliżenia ok. 21 minuty scenariusza.

Analizując pierwszy przypadek drugiego scenariusza testowego należy rozważyć, czy wyznaczone rozwiązanie jest zgodne z prawidłami COLREG. Prawidła nakazują, aby statek ustępujący drogi poruszał się za rufą statku z pierwszeństwem drogi. W opisanym scenariuszu wyminięcie statków 1 i 2 przez statek 3 za rufą statku 2 jest jednak mniej korzystnym rozwiązaniem. Optymalną ścieżkę przejścia dla statku 3, która przebiega przed dziobem statku 2, przedstawiono na rysunku 40. Wyznaczone rozwiązanie jest jednak poprawne, gdyż statek 3 nie narusza w żadnym momencie czasu domeny bezpiecznej statku 2. Zgodnie z założeniami algorytmu hEP/N, jeżeli statek 3 będzie płynąć przed dziobem statku 2 wzdłuż wyznaczonej ścieżki przejścia, nie wystąpi zagrożenie kolizją. W takim przypadku nie można mówić o nie przestrzeganiu prawideł COLREG, które dotyczą jedynie sytuacji zagrożenia zderzeniem dwóch jednostek.

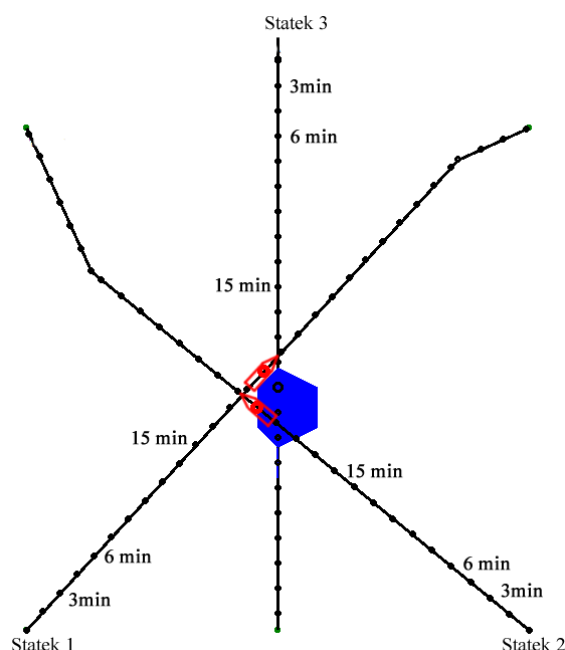
W drugim przypadku testowym statki 2 i 3 ustępują drogi statkowi 1, a statek 3 ustępuje drogi pozostałym jednostkom.



Rysunek 41 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego II – przypadek 2: statki 2 i 3 ustępują drogi statkowi 1, a statek 3 ustępuje drogi pozostałym jednostkom. Rysunek przedstawia położenie jednostek w momencie maksymalnego zbliżenia ok. 21 minuty scenariusza.

Również i w drugim przypadku testowym optymalna ścieżka przejścia statku 3, który ustępuje drogi pozostałym jednostkom, prowadzi przed dziobem statku z pierwszeństwem drogi (rysunek 41).

W trzecim przypadku testowym statek 1 i 2 ustępują drogi statkowi 3, a statek 2 ustępuje drogi pozostałym jednostkom.



Rysunek 42 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego II – przypadek 3: statek 1 i 2 ustępują drogi statkowi 3, a statek 2 ustępuje drogi pozostałym jednostkom. Rysunek przedstawia położenie jednostek w momencie maksymalnego zbliżenia ok. 21 minuty scenariusza.

W trzecim przypadku jednostki poruszają się wzdłuż skraju domeny bezpiecznej statku 3 (rysunek 42). Nie występuje ryzyko kolizji. I w tym przypadku statek, który zajmuje ostatnie miejsce w hierarchii, porusza się wzdłuż bezpiecznej ścieżki przejścia przed dziobem statku znajdującego się na pierwszym miejscu w hierarchii.

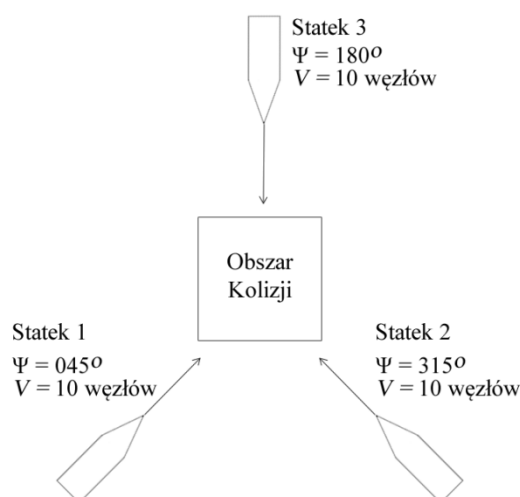
Tabela 3 – Wyniki badań dla scenariusza II.

Przypadek	Średnia wartość przystosowania			
	Statek 1	Statek 2	Statek 3	Suma
1	125	84,85	140	349,85
2	84,85	164,41	123,62	372,88
3	109	218,88	71,22	399,1

Przypadek testowy II przedstawia wykorzystanie algorytmu w przypadku, gdy sytuacja kolizyjna nie może zostać rozwiązana w oparciu o przepisy COLREG. Algorytm pozwala na zbadanie różnych przypadków pierwszeństwa drogi poszczególnych statków. W scenariuszu testowym II najbardziej korzystnym pod względem sumarycznej średniej wartości przystosowania jest przypadek pierwszy (tabela 3). Czas obliczeń wyniósł poniżej 8 sekund dla każdego badanego przypadku.

6.4 Omijanie przeszkody statycznej przez trzy statki – scenariusz testowy III

Trzeci scenariusz testowy jest rozwinięciem poprzedniego scenariusza. W analizowanej sytuacji jednostki znajdują się na kursie kolizyjnym (rysunek 43). Każda z nich porusza się z tą samą prędkością i jest jednakowo oddalona od przeszkody statycznej (np. wyspy lub obszaru mielizny). Statek 1 porusza się kursem 045° , statek 2 kursem 315° , natomiast statek 3 kursem 180° .



Rysunek 43 – Scenariusz testowy III: omijanie przeszkody statycznej przez trzy statki. Wszystkie jednostki poruszają się z tą samą prędkością i są jednakowo oddalone od przeszkody statycznej. Statek 1 porusza się kursem 045° , statek 2 podąża kursem 315° , natomiast statek 3 kursem 180° .

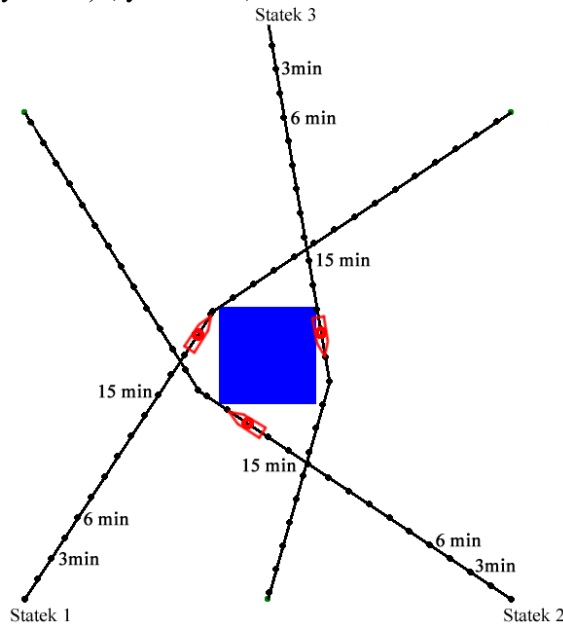
Warunki te zostały odwzorowane w algorytmie hEP/N, a badanie przeprowadzono dla następujących parametrów:

- tryb algorytmu: klasyczny,
- zakończenie poszukiwania ścieżki: warunek zbieżności: 0.99 zbieżności w ciągu 400 pokoleń,
- liczba osobników w populacji: 30,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0.8,
- selekcja: ruletkowa,
- skalowanie: potęgowe (wartość: 2),
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.15.

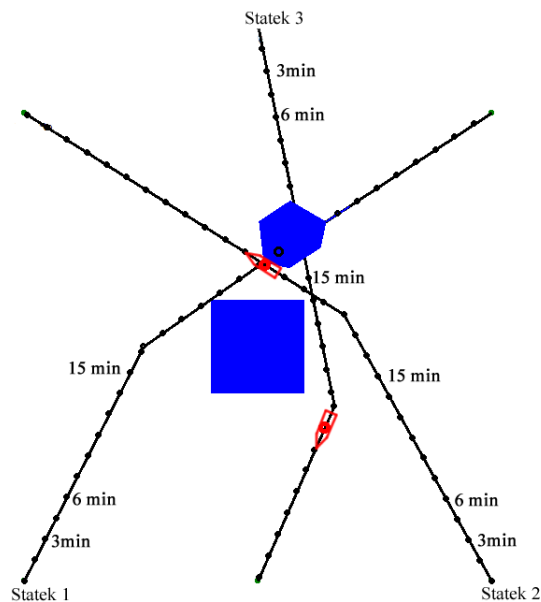
Mimo wykorzystania skalowania, zmienionego warunku zakończenia poszukiwania ścieżki oraz liczniejszej populacji, wynik otrzymywano w czasie mniejszym niż 15 sekund.

Wstępne badania omawianego scenariusza pokazały, że hierarchia statków ma w tym przypadku drugorzędne znaczenie. Ważniejsza okazuje się populacja początkowa, która determinuje rozkład ścieżek, który to następnie wpływa na rozwiązanie scenariusza nawigacyjnego. Algorytm wyznaczał rozwiązania, które można podzielić na trzy grupy:

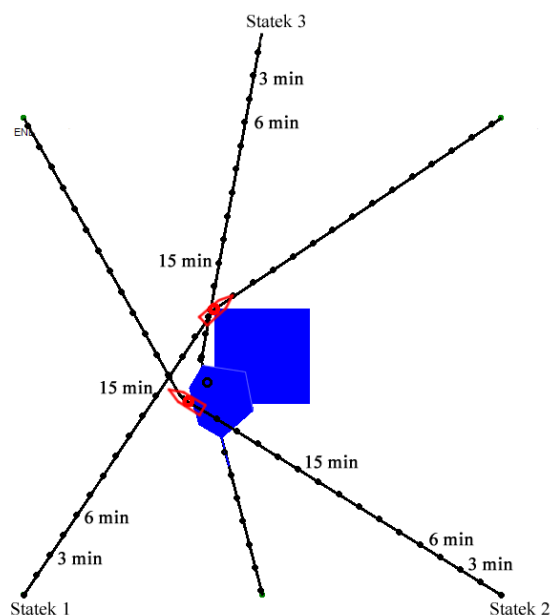
- a) wszystkie jednostki poruszają się wzdłuż innej krawędzi przeszkody. Nie występuje ryzyko kolizji. Rozwiązanie to występowało najczęściej (70% wyników) (rysunek 44),
- b) dwa statki poruszają się wzdłuż jednej krawędzi przeszkody. Pojawia się ryzyko kolizji (20% wyników) (rysunek 45),
- c) wszystkie statki poruszają się wzdłuż tej samej krawędzi przeszkody statycznej. Występuje ryzyko kolizji (10% wyników) (rysunek 46).



Rysunek 44 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego III – grupa a: wszystkie jednostki poruszają się wzdłuż innej krawędzi przeszkody. Nie występuje ryzyko kolizji. Rysunek przedstawia położenie jednostek ok. 21 minuty scenariusza.



Rysunek 45 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego III – grupa b: statek 2 porusza się wzdłuż prawej krawędzi przeszkody statycznej. Statek 3 ustępuje mu drogi i przechodzi za jego rufą. Statek 1 porusza się wzdłuż bezpiecznej ścieżki przejścia. Rysunek przedstawia położenie jednostek w momencie maksymalnego zbliżenia ok. 29 minuty scenariusza.



Rysunek 46 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego III – grupa c: wszystkie statki poruszają się wzdłuż tej samej krawędzi przeszkody statycznej. Istnieje ryzyko kolizji. Na rysunku przedstawiono zbiór ścieżek bezpiecznych. Rysunek przedstawia położenie jednostek w momencie maksymalnego zbliżenia ok. 24 minuty scenariusza.

Tabela 4 – Wyniki badań dla scenariusza testowego III.

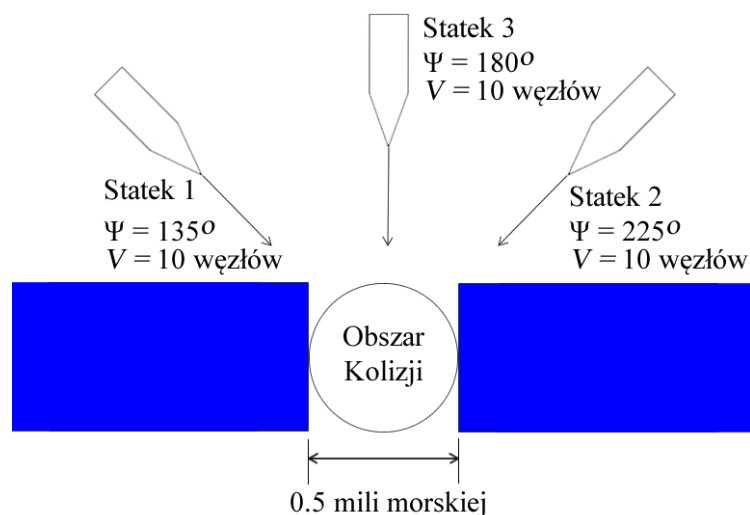
Przypadek	Średnia wartość przystosowania			
	Statek 1	Statek 2	Statek 3	Suma
1	219,23	245,09	267,16	731,48
2	320,10	219,58	381,34	921,02
3	219,25	289,93	270,07	779,19

W odróżnieniu od poprzednich badanych scenariuszy, dla scenariusza III istnieje w możliwość wyznaczenia zbioru ścieżek, która całkowicie eliminuje możliwość wystąpienia zagrożenia kolizją. Rozwiązanie takie wiąże się również z najniższą sumaryczną średnią wartością przystosowania w porównaniu z pozostałymi grupami rozwiązań (tabela 4). Warto także zwrócić uwagę, że algorytm hEP/N wyznacza zbiór bezpiecznych ścieżek przejść niezależnie od strategii i kierunku ominięcia przeszkody.

Scenariusz testowy III pokazuje, że algorytm może zostać użyty do potencjalnej optymalizacji ruchu kilku jednostek i tym samym redukcji kosztów podróży. W przypadku praktycznego wykorzystania należy rozważyć zrównoleglenie działania algorytmu. Zmniejszyłoby to ryzyko otrzymania rozwiązania nieoptymalnego.

6.5 Sytuacja kolizyjna w kanale – scenariusz testowy IV

W kolejnym badaniu odwzorowano scenariusz nawigacyjny, w którym trzy jednostki znajdują się w sytuacji potencjalnej kolizji w kanale (rysunek 47). Statek 1 porusza się kursem 135° , statek 2 kursem 225° , natomiast statek 3 kursem 180° . Wszystkie jednostki płyną z taką samą prędkością i znajdują się w jednakowej odległości od punktu PPC. W pierwszym przypadku rozważany jest kanał o szerokości 1,5 mili morskiej.

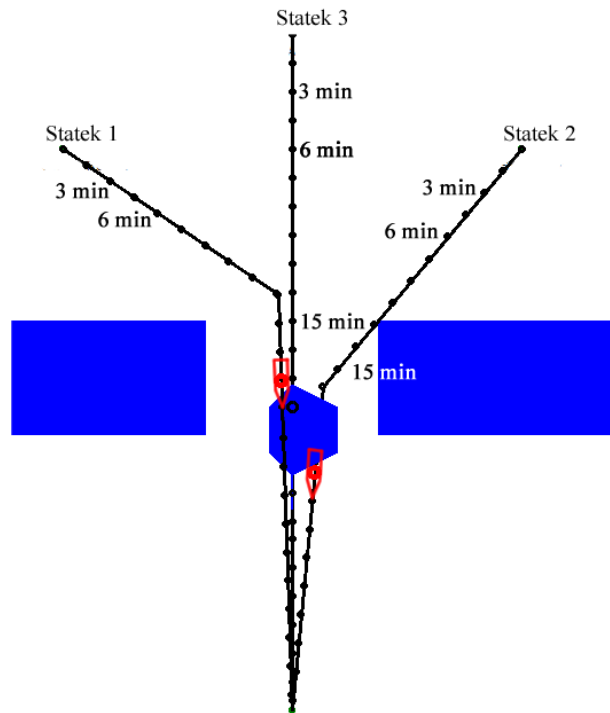


Rysunek 47 – Scenariusz testowy IV: sytuacja kolizyjna w kanale. Statek 1 porusza się kursem 135° , statek 2 kursem 225° , natomiast statek 3 kursem 180° . Wszystkie jednostki płyną z taką samą prędkością i znajdują się w jednakowej odległości od punktu PPC.

Warunki te zostały odwzorowane w hEP/N, a badanie przeprowadzono dla następujących parametrów:

- tryb algorytmu: wielopopulacyjny (liczba migracji: 5, liczba populacji: 6),
- zakończenie poszukiwania ścieżki: warunek maksymalnej liczby pokoleń: 300,
- liczba osobników w populacji: 50,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0.8,
- selekcja: turniejowa,
- skalowanie: potęgowe (wartość: 2),
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.2.

Algorytm poprawnie wyznaczył hierarchię dla przedstawionej sytuacji nawigacyjnej.

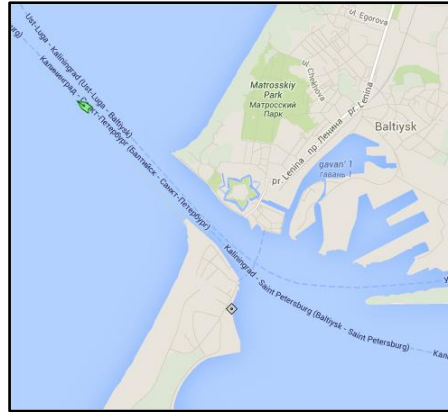


Rysunek 48 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego IV – przypadek 1: statki poruszają się jeden za drugim, nie stwarzając ryzyka kolizji. Zgodnie z prawidłami COLREG statek 2 ustępuje drogi statkowi 3, a statek 1 ustępuje drogi pozostałym jednostkom. Rysunek przedstawia położenie statków w ok. 20 minucie scenariusza.

Wyznaczone ścieżki przedstawiono na rysunku 48. Czas wyznaczenia rozwiązania dla scenariusza testowego IV wynosił około 1 minuty. Wydłużony czas obliczeń wynika z wyboru algorytmu wielopopulacyjnego, który z największym prawdopodobieństwem wyznacza rozwiązanie zbliżone do optymalnego. Algorytm hEP/N pracujący w trybie klasycznym oraz inkrementacyjnym nie znajduje ścieżek przejść bliskich optymalnym dla środowisk z kanałem.

W wyznaczonym rozwiązaniu zgodnie z prawidłami COLREG statek 2 ustępuje drogi statkowi 3, a statek 1 ustępuje drogi pozostałym jednostkom (rysunek 49). Warto zaobserwować, że zarówno statki 2 i 3 płyną kursem optymalnym i jedynie statek 1 porusza się wzdłuż nieoptymalnej ścieżki, która pozwala tej jednostce uniknąć kolizji z pozostałymi statkami.

Jako rozwinięcie tego scenariusza, zbadano również przypadek, gdy kanał jest węższy niż domena bezpieczna statku. Wybrano kanał o szerokości 0,5 mili morskiej, który przypomina Cieśninę Piławską (Bugajski 2009) (rysunek 49). Cieśnina ta ma 2 km długości oraz 750 m szerokości w najszerszym punkcie.

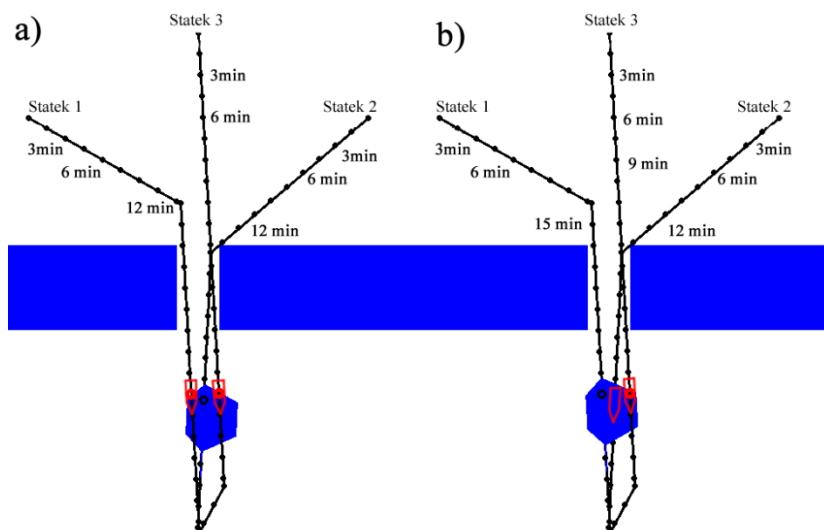


Rysunek 49 – Cieśnina Piławska w rejonie obwodu kaliningradzkiego (WWW – GM).

Warunki te zostały odwzorowane w algorytmie hEP/N, a badanie przeprowadzono dla następujących parametrów:

- tryb algorytmu: wielopopulacyjny (liczba migracji: 5, liczba populacji: 6),
- zakończenie poszukiwania ścieżki: warunek maksymalnej liczby pokoleń: 200,
- liczba osobników w populacji: 50,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0.8,
- selekcja: turniejowa,
- skalowanie: potęgowe (wartość: 2),
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.2.

Algorytm poprawnie wyznaczył hierarchię dla przedstawionej sytuacji nawigacyjnej. Zgodnie z prawidłami COLREG statek 2 ustępuje drogi statkowi 3, a statek 1 ustępuje drogi pozostałym jednostkom.



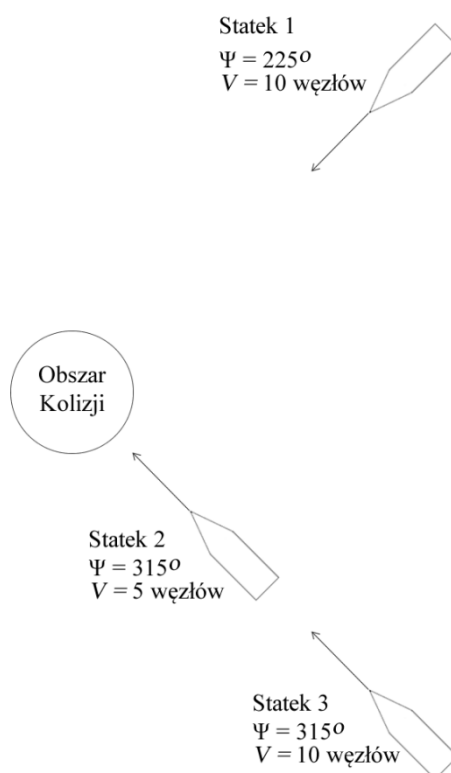
Rysunek 50 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego IV – przypadek 2: statki poruszają się jeden za drugim, nie stwarzając ryzyka kolizji. Zgodnie z prawidłami COLREG statek 2 ustępuje drogi statkowi 3, a statek 1 ustępuje drogi pozostałym jednostkom. a) widoczny obszar bezpieczny statku 3, któremu statek 2 ustępuje drogi, b) widoczny obszar bezpieczny statku 1, któremu pozostałe jednostki ustępują drogi.

Wyznaczone ścieżki przedstawiono na rysunku 50. Podobnie jak w poprzednim przypadku, tak i przy węższym kanale, algorytm znajdował rozwiązanie w czasie około 1 minuty. Statki 1 i 3 poruszały się za statkiem 2, któremu ustępowały drogi. Zgodnie z założeniami algorytmu statek 1 znajduje w domenie bezpiecznej statku 3, gdyż to statek 3 ustępuje drogi statkowi 1, którego domena bezpieczna nie jest naruszona. Wyznaczone ścieżki spełniają zatem założenia algorytmu a statki poruszają się po optymalnych, zgodnych z prawidłami COLREG, ścieżkach przejść.

6.6 Sytuacja kolizyjna podczas wyprzedzania jednostki – scenariusz testowy V

Kolejny scenariusz testowy przedstawia sytuację, podczas której często dochodzi do kolizji na morzu. Trzy jednostki znajdują się na kursie kolizyjnym (rysunek 51). Statki 2 i 3 poruszają się kursem 315°. Statek 3 wyprzedza statek 2. Porusza się on z prędkością 10 węzłów i jest dwukrotnie bardziej oddalony od miejsca potencjalnej kolizji od statku 2, poruszającego się z prędkością 5 węzłów. Statek 1 płynie kursem 225° z prędkością 10 węzłów i jest oddalony od miejsca kolizji o taką samą odległość jak statek 3.

Podobna sytuacja, przy której doszło do kolizji, wydarzyła się na wodach Cieśniny Tajwańskiej 8 kwietnia 2005 roku. Jednostka Lykes Voyager zderzyła się wówczas podczas manewru wyprzedzania z niemieckim kontenerowcem Washington Senator (Marine Accident Investigation Branch 2006).



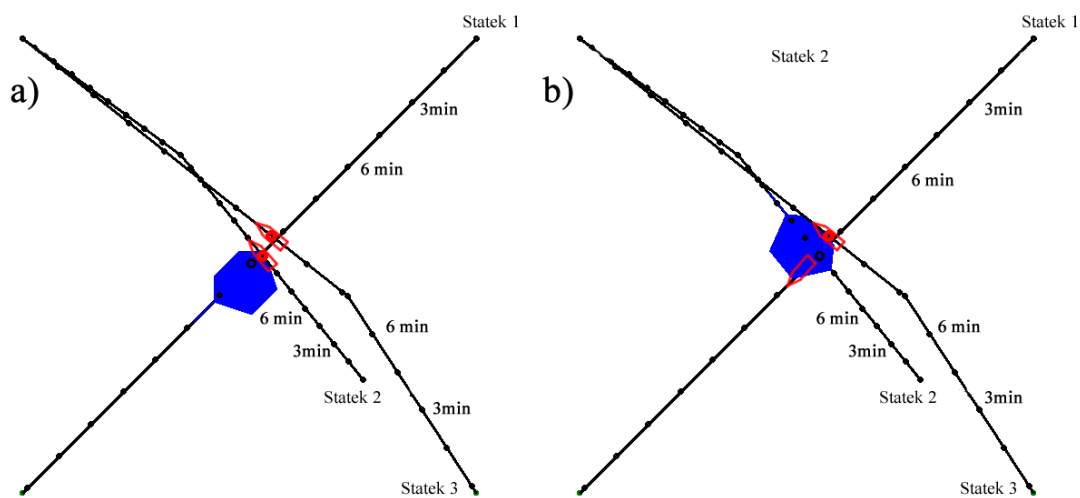
Rysunek 51 – Scenariusz testowy V: sytuacja kolizyjna w czasie wyprzedzania jednostki. Statek 2 i statek 3 poruszają się kursem 315°. Statek 3 porusza się z prędkością 10 węzłów i wyprzedza statek 2, który płynie z prędkością 5 węzłów. Statek 1 porusza się kursem 225° z prędkością 10 węzłów.

W tym scenariuszu, zgodnie z przepisami COLREG, statek 3, który rozpoczął manewr wyprzedzania statku 2, powinien wyminąć również statek 1 za jego rufą. Z kolei statek 2 powinien ustąpić drogi statkowi 1. Dla celów badań rozważono alternatywne hierarchie.

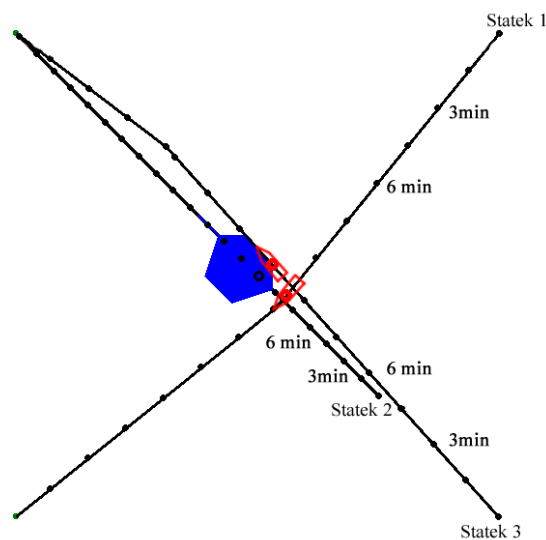
Warunki te zostały odwzorowane w algorytmie hEP/N, a badanie przeprowadzono dla następujących parametrów:

- tryb algorytmu: wielopopulacyjny (liczba migracji: 5, liczba populacji: 6),
- zakończenie poszukiwania ścieżki: warunek maksymalnej liczby pokoleń: 200,
- liczba osobników w populacji: 50,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0.8,
- selekcja: turniejowa,
- skalowanie: potęgowe (wartość: 2),
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.15.

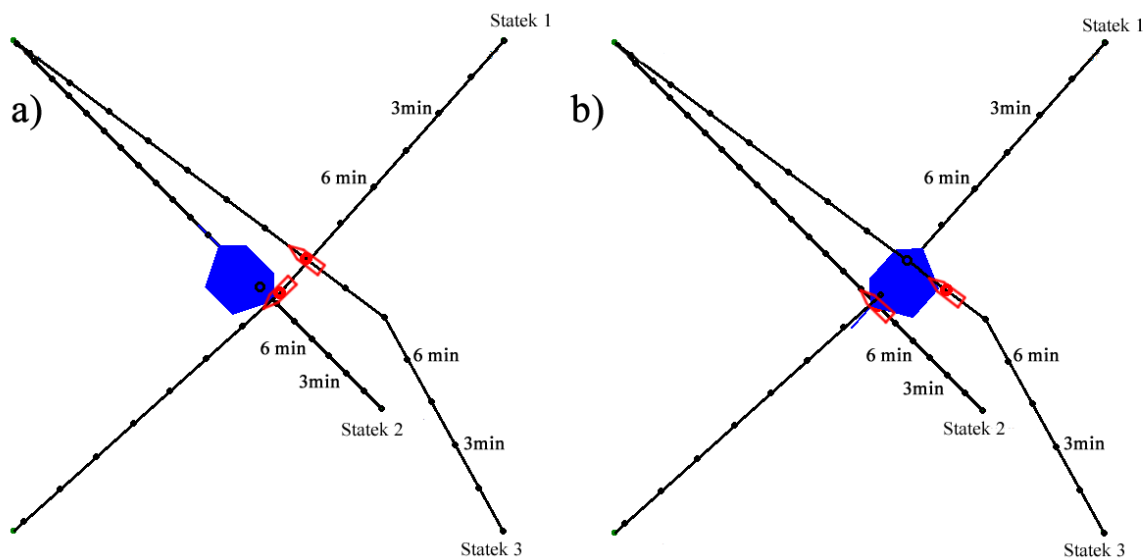
Algorytm poprawnie wyznaczył hierarchię dla przedstawionej sytuacji nawigacyjnej. Ścieżki wyznaczone zgodnie z zasadami COLREG przedstawiono na rysunku 52. Rozwiązania dla alternatywnych hierarchii zawarto na rysunkach 53 i 54.



Rysunek 52 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego V – przypadek 1: statek 2 ustępuje drogi statkowi 1 zgodnie z zasadami COLREG. Statek 3 wyprzedza statek 2 i ustępuje drogi statkowi 1. a) Statek 2 w momencie maksymalnego zbliżenia ze statkiem 1. b) Statek 3 w momencie maksymalnego zbliżenia ze statkiem 1.



Rysunek 53 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego V – przypadek 2: statek 3 wyprzedza statek 2, a statek 1 ustępuje drogi statkom 2 i 3 w tej kolejności. Rysunek przedstawia położenie statków w momencie maksymalnego zbliżenia ok. 11 minuty scenariusza.



Rysunek 54 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego V – przypadek 3: statek 3 wyprzedza statek 2, jednocześnie ustępując drogi statkowi 1. Statek 1 ustępuje drogi statkowi 2. a) Statek 1 w momencie maksymalnego zbliżenia ze statkiem 2. b) Statek 1 w momencie maksymalnego zbliżenia ze statkiem 3.

Tabela 5. Wyniki badań dla scenariusza testowego V.

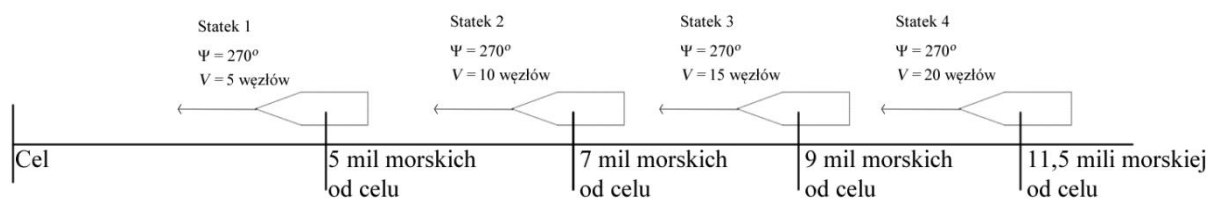
Przypadek	Średnia wartość przystosowania			
	Statek 1	Statek 2	Statek 3	Suma
1	84,85	151,96	158,23	395.04
2	125,27	63,72	121,12	310.11
3	141,54	63,72	146,23	351.49

Badanie to pokazuje, że algorytm hEP/N w czasie zbliżonym do rzeczywistego i z uwzględnieniem prawideł COLREG może wyznaczyć rozwiązanie dla manewru wyprzedzania. Uwzględniono jednocześnie ryzyko kolizji z kolejną jednostką, czego brak jest wadą wielu innych metod wyznaczania ścieżek przejść omówionych w rozdziale 3. Warto również zauważyć, że zgodnie z tabelą 5, przypadek 1, który reprezentuje hierarchię zgodną z prawidłami COLREG, cechuje się najgorszą sumą wartości przystosowania wszystkich jednostek w porównaniu do przypadków 2 i 3, w których badano alternatywne hierarchie. Scenariusz testowy V pokazuje zatem, że zbiór bezpiecznych ścieżek przejść zgodny z prawidłami COLREG nie musi być rozwiązaniem optymalnym. W przypadku pominięcia tych prawideł, możliwe jest wyznaczenie korzystniejszego, względem pozostałych założonych celów optymalizacji, zbioru bezpiecznych ścieżek przejść. Czas obliczeń wynosił poniżej 15 sekund dla każdego badanego przypadku.

6.7 Wyprzedzanie wielu statków – scenariusz testowy VI

Potencjalnym zastosowaniem hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść jest umożliwienie statkom poruszającym się w niewielkiej odległości, jednym kursem i z różnymi prędkościami pokonanie bezpiecznie drogi do punktu docelowego bez konieczności redukcji prędkości. W zakładanym przypadku wszystkie obiekty muszą wyprzedzić statki przed sobą, aby dotrzeć do celu. Zmiana prędkości zwiększa koszty pokonania ścieżki, a jej redukcja wydłuża czas podróży. Wyprzedzanie pojedynczej jednostki jest typowym manewrem na morzu. Jednak sytuacja, w której trzy kolejne statki wymijają jednostki przed sobą, jest ryzykowna i niewskazana. Wykorzystując algorytm hEP/N możliwe jest przygotowanie bezpiecznego planu realizacji takiego manewru. Pozwoli on wszystkim jednostkom dotrzeć do celu bez zmiany prędkości poruszając się wzdłuż optymalnych ścieżek przejść.

W analizowanym przypadku każdy kolejny statek porusza się kursem 270° z prędkością wyższą od jednostki, którą wyprzedza (statek 1 z prędkością 5 węzłów, statek 2 – 10 węzłów, statek 3 – 15 węzłów, statek 4 – 20 węzłów). Jednostki te znajdują się w różnych odległościach od celu (rysunek 55).

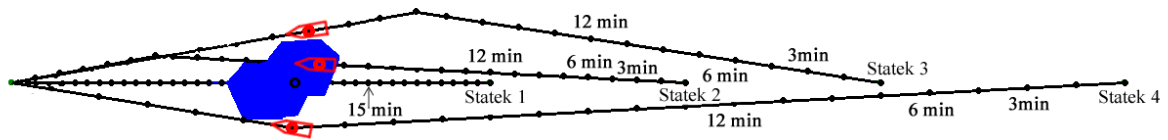


Rysunek 55 – Przypadek testowy VI: wyprzedzanie wielu statków. Statki poruszają się kursem 270° : statek 1 z prędkością 5 węzłów w odległości 5 mil od celu, statek 2 – 10 węzłów w odległości 7 mil od celu, statek 3 – 15 węzłów 9 mil od celu, statek 4 – 20 węzłów w odległości 11,5 mili od celu.

Warunki te zostały odwzorowane w algorytmie hEP/N, a badanie przeprowadzono dla następujących parametrów:

- tryb algorytmu: wielopopulacyjny (liczba migracji: 5, liczba populacji: 6),
- zakończenie poszukiwania ścieżki: warunek maksymalnej liczby pokoleń: 200,
- liczba osobników w populacji: 50,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0.8,
- selekcja: ruletkowa,
- skalowanie: potęgowe (wartość: 2),
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.15.

Algorytm poprawnie wyznaczył hierarchię dla przedstawionej sytuacji nawigacyjnej. Statek wyprzedzany zawsze znajdował się na wyższej pozycji w hierarchii względem jednostki wyprzedzającej.



Rysunek 56 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego VI w około 21 minucie czasu rzeczywistego.

Na rysunku 56 przedstawiono pozycję statków w około 24 minucie czasu rzeczywistego, gdy jednostki dzieli minimalna odległość. Na rysunku tym pokazano obszary domen bezpiecznych statków 1 i 2. Statek 2 dodatkowo oznaczono obrysem kadłuba, podobnie jak statki 3 i 4.

Przy analizie rozwiązania pominięto wyniki wartości przystosowania, gdyż dla tak opisanego scenariusza testowego najważniejsza jest wypracowana strategia. Wydłużony czas obliczeń (wynoszący średnio około 1 minuty) wynikał ze znacznej liczby kolizji na małym obszarze. Statki 2 i 3 wykonują manewr wyprzedzania zgodnie z prawidłami COLREG. Statek 4 wyprzedza pozostałe jednostki, więc, w konsekwencji korekcji kursu statku 3, wykonuje zwrot w lewo. Pozwala to uniknąć domeny bezpiecznej statku 1 (statek 3 ustępuje drogi). Nie narusza jednocześnie domeny bezpiecznej żadnego z pozostałych obiektów, więc przestrzeganie prawideł COLREG, wg. wymagań algorytmu hEP/N, zostaje zachowane.

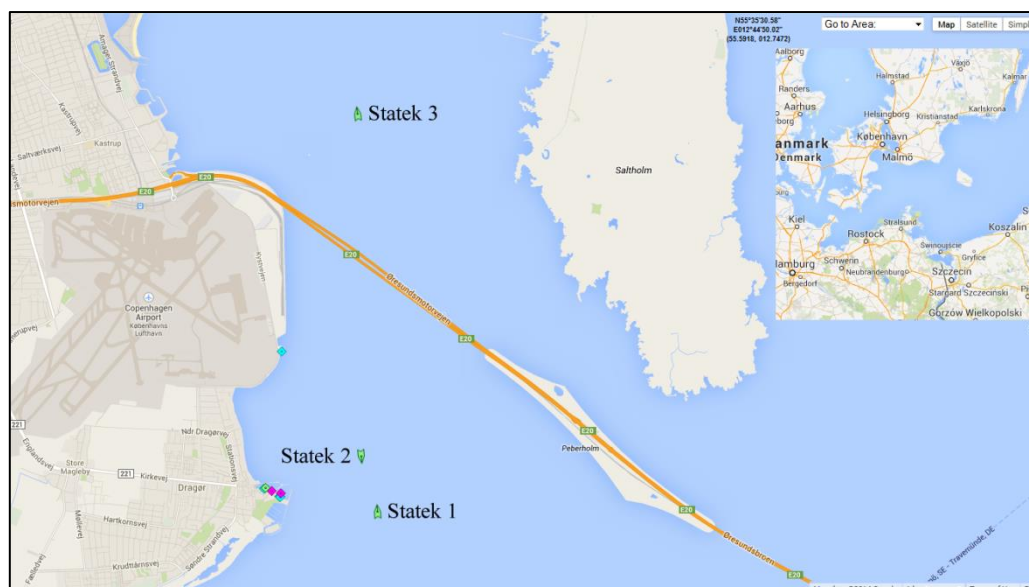
6.8 Przykładowe odwzorowania rzeczywistej implementacji systemu opartego na algorytmie hEP/N – scenariusze testowe VII i VIII

Dotychczasowe badania obejmowały hipotetyczne sytuacje kolizyjne. W scenariuszach testowych VII i VIII analizowano wybrane obszary rzeczywiste, objęte obserwacją przez systemy VTS. Badanie miało na celu przedstawić działanie algorytmu hEP/N w warunkach eksploatacji. W przypadku tych badań zrezygnowano z przedstawiania pozycji jednostek w czasie.

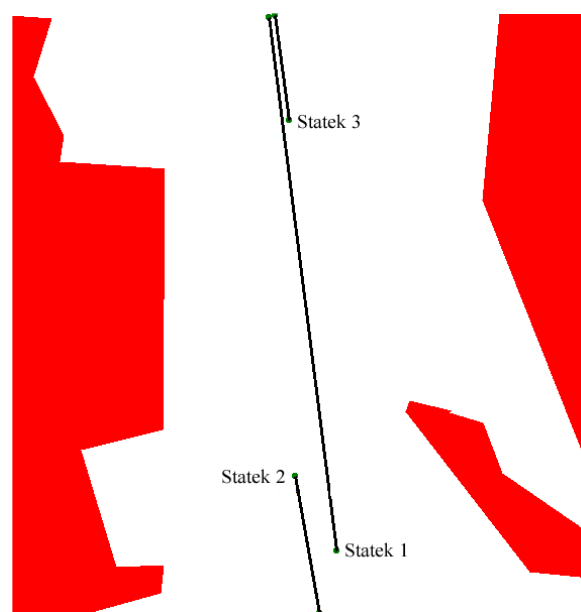
Pierwszym wybranym obszarem był rejon morski koło duńskiej wyspy Saltholm w obszarze działania systemu VTS-Malmö w Szwecji (WWW – VTS). Rysunek 57 przedstawia badane środowisko oraz jednostki poruszające się w granicach obserwowanego obszaru dnia 26 kwietnia 2014 roku o godzinie 18:00. Szczegółowe dane statków City of Rotterdam, Dependent i Yashma zostały zebrane w rozdziale 9.9.1. Badanie przeprowadzono dla następujących parametrów:

- tryb algorytmu: klasyczny,
- zakończenie poszukiwania ścieżki: warunek maksymalnej liczby pokoleń: 400,
- liczba osobników w populacji: 30,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0.8,
- selekcja: ruletkowa,
- skalowanie: potęgowe (wartość: 2),
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.15.

Algorytm hEP/N potrzebował średnio 7 sekund, by wyznaczyć ścieżki dla sytuacji nawigacyjnej przedstawionej na rysunku 57.



Rysunek 57 – Scenariusz testowy VII: obszar morski w okolicach wyspy Saltholm i odczyt z AIS dla dnia 26.04.2014 o godzinie 18:00. (WWW – GM; WWW – AIS).



Rysunek 58 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego VII.

Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 58. Nie dochodzi tutaj do sytuacji kolizyjnych, a każda z trzech jednostek może poruszać się wzdłuż wyznaczonego kursu po ścieżkach optymalnych. Zbliżona do rzeczywistej linia brzegowa nie ma wpływu na wynik symulacji. Punkty docelowe statków zostały ustalone na krawędziach środowiska według ich odczytanego kursu, ponieważ punkty docelowe odczytane z systemu AIS nie znajdowały się w zakresie analizowanego środowiska.

Przypadek ten pokazuje, że w obszarach o niskim ryzyku kolizji algorytm może być używany w czasie zbliżonym do rzeczywistego (zależnym od czasu odświeżania informacji w systemie AIS). Pozwala to również na nadzór nad poprawnością realizacji przekazanej decydującemu ścieżki przejścia.

W scenariuszu testowym VIII zbadano środowisko, w którym znajdowało się więcej jednostek. Rysunek 59 przedstawia obszar morski w rejonie działania systemu VTS w okolicach miasta Laem Chabang w Tajlandii (WWW – LM) i odczyt z systemu AIS w dniu 28.04.2014 o godzinie 17:00. W analizowanej sytuacji wyznaczano ścieżki dla sześciu jednostek. Poruszające się statki, które w danej chwili znalazły się w zasięgu systemu AIS to Rug302, APL Amman, NP Suratthani, Wan Hai 275, Acx Diamond i Kohinoor. Ich dane zostały zebrane w rozdziale 9.9.2.

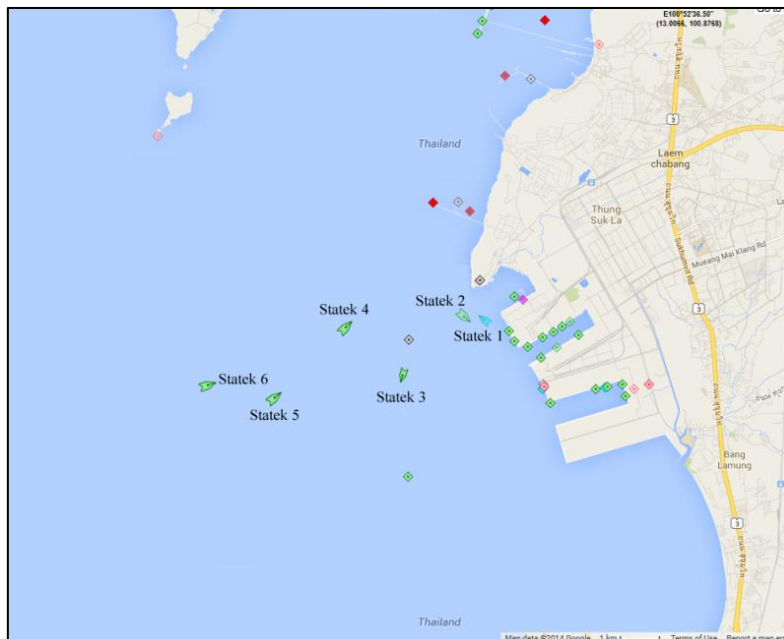
Badanie przeprowadzono dla następujących parametrów:

- tryb algorytmu: klasyczny,
- zakończenie poszukiwania ścieżki: warunek maksymalnej liczby cykli: 400,
- liczba osobników w populacji: 30,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0.8,
- selekcja: ruletkowa,
- skalowanie: potęgowe (wartość: 2),
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.2.

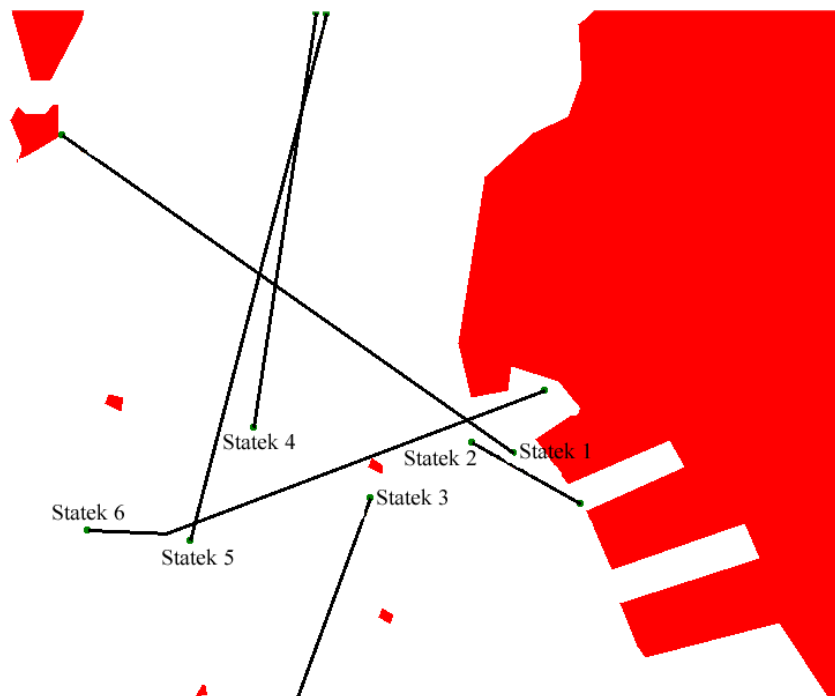
Algorytm poprawnie wyznaczył hierarchię dla przedstawionej sytuacji nawigacyjnej przedstawionej na rysunku 59.

W trakcie symulacji określono, że statkom 1, 2, 3 i 4 nie grozi kolizja z żadną z pozostałych jednostek. Jednak statkom 5 (Acx Diamond) i 6 (Kohinoor) groziła potencjalna kolizja. Dlatego też

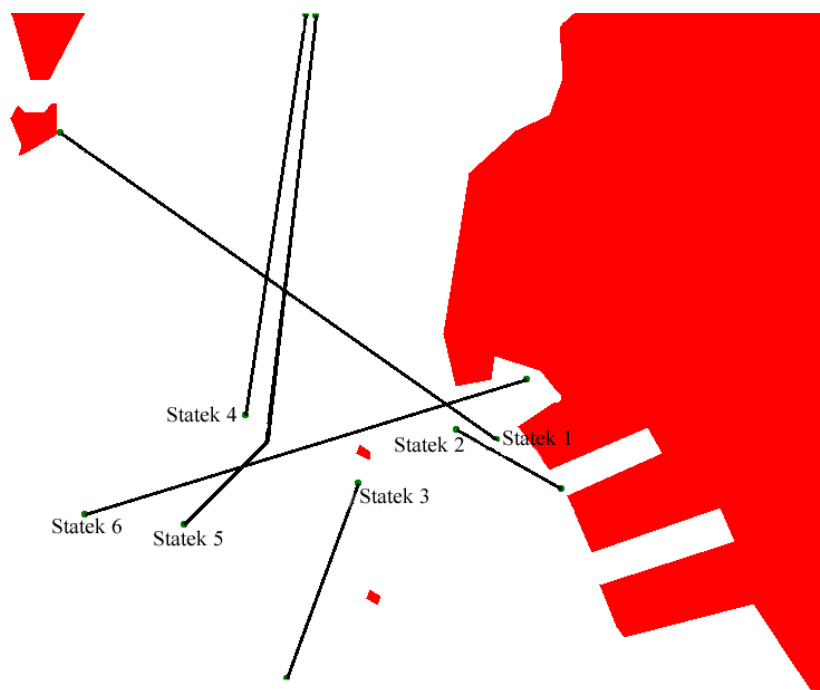
przeprowadzono badania dla dwóch przypadków: gdy statek 5 ustępuje drogi statkowi 6 zgodnie z prawidłami COLREG (rysunek 60) i sytuacji, w której pierwszeństwo drogi, niezgodnie z prawidłami COLREG, otrzymuje statek 5 (rysunek 61). Czas wyznaczenia rozwiązania wynosił średnio 13 sekund.



Rysunek 59 – Scenariusz testowy VIII: obszar morski w okolicach miasta Laem Chabang (Tajlandia) i odczyt z systemu AIS dla dnia 28.04.2014 o godzinie 17:00 (WWW – GM).



Rysunek 60 – Ścieżki wyznaczone dla scenariusza testowego VIII – przypadek 1: statek 5 ustępuje drogi statkowi 6 zgodnie z prawidłami COLREG.



Rysunek 61 – Ścieżki wyznaczone dla scenariusza testowego VIII – przypadek 2: statek 6 ustępuje drogi statkowi 5 niezgodnie z przepisami COLREG.

W drugim przypadku środowiska testowego VIII algorytm wyznaczył rozwiązania, które pozwoliły zapobiec potencjalnej kolizji statków 5 i 6. Warto podkreślić, że algorytm znalazł rozwiązanie w czasie zbliżonym do rzeczywistego pomimo znacznej liczby jednostek.

Celem przedstawionych powyżej sytuacji kolizyjnych było losowe wybranie obszarów objętych nadzorem systemu VTS o rozmiarach odpowiadających testowym wymiarom środowiska i zbadanie ich z użyciem algorytmu hEP/N. Scenariusze VII i VIII potwierdziły, że algorytm hEP/N może zostać wykorzystany w warunkach rzeczywistych.

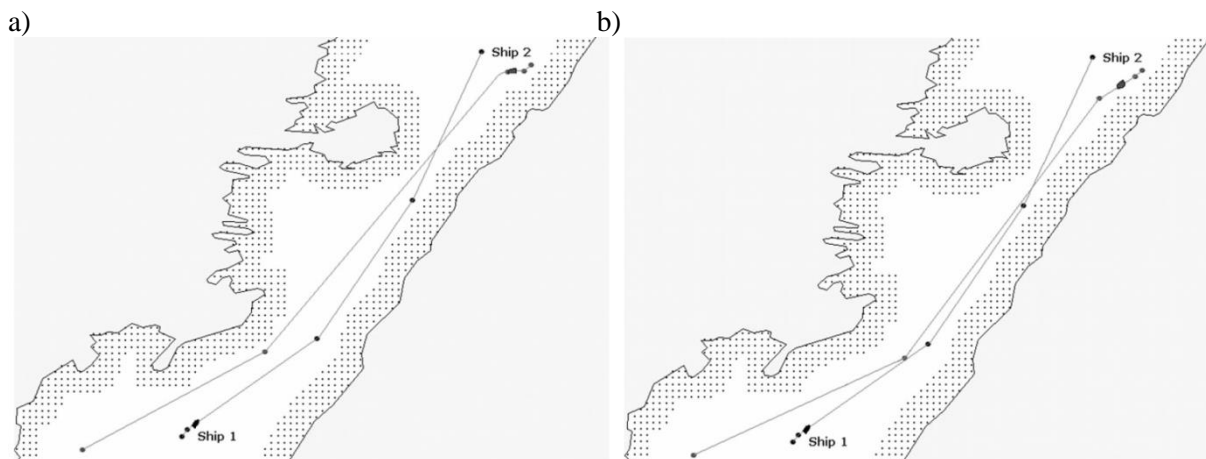
6.9 Badanie porównawcze hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść z metodą ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii – scenariusz testowy IX

W celu zbadania poprawności metody dokonano również porównania wyników ze zbliżoną do hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść, metodą ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii (Szłapczyński 2009). Jako punkt odniesienia przyjęto porównanie przedstawione w pracy (Szłapczyński 2012b), gdzie zestawiono wyniki metody ewolucyjnej zbiorów bezpiecznych trajektorii (rysunek 62a)) z wynikami klasycznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść (rysunek 62 b)). Metoda ta, podobnie jak algorytm hEP/N++, wyznacza ścieżki przejść na morzu tylko dla wybranego statku własnego. Pozostałe znajdujące się w środowisku algorytmu statki traktowane są jako obiekty poruszające się stałym kursem ze stałą prędkością. Na rysunku 62 b) przedstawiono zestawienie dwóch symulacji dla statku 1 i 2 przeprowadzonych przez klasyczny algorytm ewolucyjny. W pierwszym eksperymencie statek 1 był traktowany jako statek własny, a statek 2 był obiektem poruszającym się po stałym kursie i ze stałą prędkością (10 węzłów) z pominięciem przeszkód statycznych i dynamicznych. W drugim eksperymencie role statku własnego i obiektu zostały zamienione. Ścieżki wyznaczone przez algorytm hEP/N zostały przedstawione na rysunku 63.

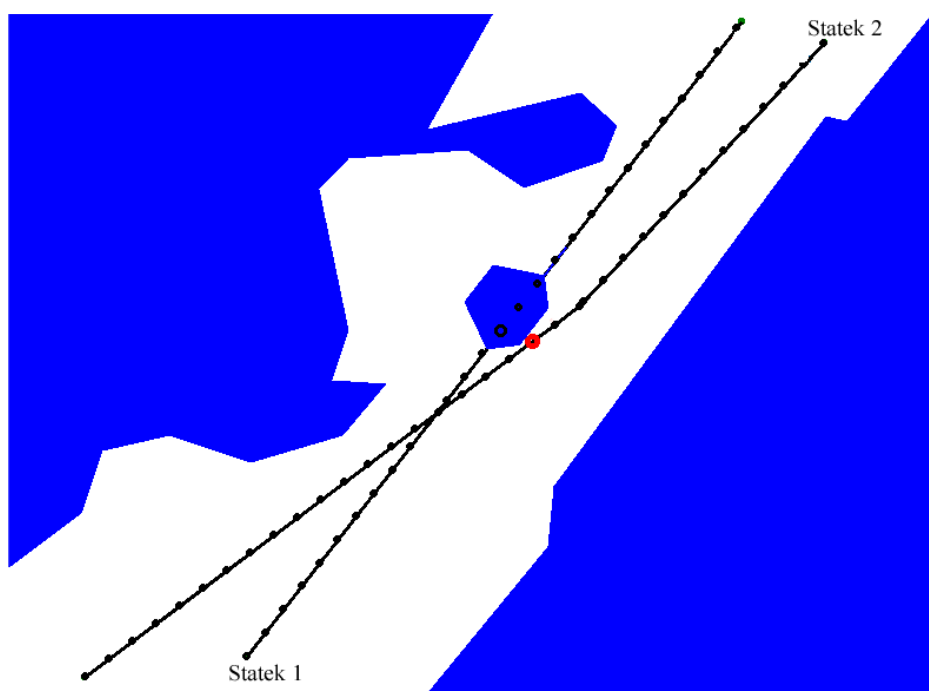
Środowisko wykorzystane w celu przeprowadzenia porównania z (Szłapczyński 2012b) zostało odtworzone w algorytmie hEP/N z pewnymi uproszczeniami. Środowisko algorytmu hEP/N ma stałe wymiary i odpowiada obszarowi rzeczywistemu o długości 12 i szerokości 6 mil morskich, podczas gdy obszar prezentowany w omawianych symulacjach wynosi ok. 25 mil morskich długości i szerokości. W symulacji z rysunku 63 w sposób przybliżony oddano kształt wzorcowego środowiska z zachowaniem skali szerokości cieśniny w górnej części środowiska, która była kluczowa dla wyznaczenia zbioru bezpiecznych ścieżek przejść. Oba statki w przedstawionym scenariuszu testowym poruszają się z prędkością 10 węzłów. Statek 2 ustępuje drogi statkowi 1, aby uniknąć kolizji. Warto podkreślić, że w środowisku przedstawionym na rysunku 63 pominięto obszar płycizny zaznaczony na symulacjach z rysunku 62 jako zakropkowany obszar. Ze względu na przeskalowanie, obszar ten został włączony do wielokąta przeszkody statycznej odwzorowującej linię brzegową. W obecnej wersji algorytm hEP/N nie posiada możliwości graficznego przedstawienia różnych obszarów zakazanych.

Badanie w algorytmie hEP/N przeprowadzono dla następujących parametrów:

- tryb algorytmu: klasyczny,
- zakończenie poszukiwania ścieżki: warunek maksymalnej liczby pokoleń: 400,
- liczba osobników w populacji: 30,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0.8,
- selekcja: ruletkowa,
- skalowanie: potęgowe (wartość: 2),
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.03.



Rysunek 62 – Porównanie wyników rozwiązania scenariusza spotkania statków w różnych algorytmach ewolucyjnych (Szlarczyński 2012b): a) rozwiązanie wyznaczone przez metodę ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii. Statki poruszają się po ścieżkach przejść zgodnych z prawidłami COLREG; b) ścieżki przejść wyznaczone dla statku 1 i statku 2 (niezależnie) stosując klasyczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść. Ścieżki te grożą kolizją (Szlarczyński 2012b).



Rysunek 63 – Ścieżki przejść wyznaczone dla scenariusza testowego IX przez algorytm hEP/N – statek 2 ustępuje drogi zgodnie z prawidłami COLREG.

Porównanie klasycznej metody ewolucyjnej z metodą ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii udowadnia wyższość tej drugiej. Należy jednak uwzględnić, że klasyczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek nie jest przystosowana do wyznaczania ścieżek przejść dla wielu statków.

Porównanie hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść z metodą ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii przy wykorzystaniu analizy przebiegu ścieżek przejść wyznaczonych przez oba algorytmy pokazuje, że obie metody pozwalają wyznaczyć zbiór bezpiecznych ścieżek przejść uwzględniających prawidła COLREG. Warto jednak zauważyć, że

algorytm hEP/N wyznacza ścieżki przejść krótsze o mniejszej liczbie punktów zwrotu w porównaniu do ewolucyjnej metody bezpiecznych trajektorii. W pracy (Szłapczyński 2012b) nie podano czasu potrzebnego dla wyznaczenia przedstawionych rozwiązań. Podkreśla się jednak, że założeniem tej metody jest czas wyliczeń mniejszy niż 1 minuta. Algorytm hEP/N wyznaczył rozwiązanie analizowanego scenariusza w czasie 12 sekund.

Ze względu na przybliżone odwzorowanie środowiska, nie można określić przewagi jednej metody nad drugą. Ścieżki przejść wyznaczone przez algorytm hEP/N wskazują jednak, że po przeskalowania środowiska i domeny bezpiecznej statków, hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść może wyznaczać ścieżki krótsze od ścieżek wyznaczonych przez metodę ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii.

6.10 Podsumowanie badań

Badania wykazały, że hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść jest skutecznym systemem wspomaganie decyzji w obszarach o dużym natężeniu ruchu. Zostały zatem spełnione wymagania zdefiniowane w rozdziale 1.2. Wykorzystujący hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść algorytm hEP/N wyznacza bezpieczne, optymalne lub zbliżone do optymalnych ścieżki zarówno dla rzeczywistych jak i hipotetycznych sytuacji nawigacyjnych na morzu. Dziewięć scenariuszy testowych wykazało, że algorytm hEP/N wyznacza rozwiązanie w czasie zbliżonym do rzeczywistego, który wynosił średnio 21 sekund. Jedynie scenariusze testowe IV i VI wymagały dłuższego czasu obliczeń (około 60s), jednak czas ten pozwala na wyznaczanie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść w oparciu o aktualne dane pobrane z systemu AIS.

Badania uwzględniające różne hierarchie dla wybranych scenariuszy testowych wykazały, że algorytm hEP/N wyznacza bezpieczne ścieżki dla przypadków zarówno uwzględniających, jak i pomijających przepisy COLREG. Oznacza to również, że algorytm hEP/N pozwala na wyznaczenie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść w wypadku, gdy nie jest możliwe rozwiązanie danej sytuacji nawigacyjnej w oparciu o przepisy COLREG (scenariusz testowy II). W przypadku proponowanego w scenariuszu testowym III zrównoleglenia obliczeń, algorytm hEP/N może wyznaczyć zbiór alternatywnych rozwiązań i rekomendować operatorowi te, które minimalizują ryzyko kolizji, przestrzegając jednocześnie przepisów COLREG. W scenariuszu testowym IV wykazano, że algorytm hEP/N może wyznaczyć rozwiązania w sytuacji, gdy kilka statków chce przepłynąć przez kanał. Przypadek ten cechował się jednak wydłużonym czasem obliczeń. Scenariusz testowy V udowodnił, że ewolucyjna hierarchiczna metoda wyznaczania ścieżek przejść pozwala na wyznaczenie optymalnych rozwiązań, nawet jeżeli danemu statkowi grozi kolizja z wieloma jednostkami. Udowodniono również zasadność wykorzystania mechanizmu hierarchii, gdyż w scenariuszu testowym V rozwiązanie, które nie było zgodne z przepisami COLREG, cechowało się najkorzystniejszą wartością przystosowania. W warunkach rzeczywistych rozwiązanie to można by wykorzystać jedynie w jednej z sytuacjach awaryjnych opisanych w rozdziale 5.2.4. Na przykładzie scenariusza testowego VI wykazano, że hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść można wykorzystać w zadaniach planowania manewrów obejmujących wiele statków. W scenariuszach testowych VII i VIII przedstawiono przykłady potencjalnego wykorzystania metody w warunkach rzeczywistych. Dla dwóch wybranych obszarów rozwiązania zostały wyznaczone w czasie zbliżonym do czasu odświeżania parametrów dynamicznych jednostek dostępnych w systemie AIS. Scenariusz testowy IX pokazuje, że hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść jest metodą potencjalnie lepszą od opracowanej wcześniej metody ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii.

Scenariusze testowe badano wykorzystując różne zestawy parametrów algorytmu hEP/N. Kluczowy stał się wybór trybu algorytmu. Klasyczny tryb algorytmu wyznaczał ścieżki w czasie poniżej 15 sekund dla scenariuszy, w których liczba kolizji była niewielka (scenariusz testowy I, II, III, V, VIII i IX). Dla scenariuszy, dla których tryb klasyczny algorytmu nie znajdował korzystnych rozwiązań, wykorzystano tryb algorytmu wielopopulacyjnego. Cechuje się on dłuższym czasem obliczeń. Zapewnia jednak większe prawdopodobieństwo wyznaczenia rozwiązania optymalnego lub zbliżonego do optymalnego. Algorytm inkrementacyjny nie pozwalał otrzymać oczekiwanych rozwiązań dla żadnego z przedstawionych scenariuszy. Został on pominięty na etapie wstępnych badań.

7 Podsumowanie

W pracy zaprezentowano hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść działającą w oparciu o algorytm hEP/N, który stanowi rozwinięcie algorytmu $\mathfrak{H}EP/N++$. Metoda ta pozwala na wyznaczenie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść statków dla dowolnej sytuacji nawigacyjnej w obszarze o dużym natężeniu ruchu w czasie zbliżonym do rzeczywistego. W procesie wyznaczania ścieżek przejść uwzględnia się przepisy COLREG, które określają pierwszeństwo drogi statku w sytuacji potencjalnej kolizji dwóch jednostek. Wyznacza się w tym celu hierarchię statków znajdujących się w obserwowanym środowisku. Pozycja danej jednostki w hierarchii określa, którym statkom dana jednostka ustępuje drogi według tych przepisów. Modyfikacja hierarchii pozwala natomiast wyznaczać optymalne lub zbliżone do optymalnych rozwiązania w sytuacjach awaryjnych, gdy dany statek nie stosuje się do przepisów COLREG. Hierarchiczna ewolucyjna metoda wyznaczania ścieżek przejść została przygotowana jako system wspomaganie decyzji rozszerzający funkcjonalność systemu VTS, natomiast wymagane dane wejściowe można pozyskać z systemu AIS.

W ramach przeprowadzonych prac badawczych zrealizowano następujące zadania:

1. Zdefiniowano problem wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść dla statków znajdujących się w obszarze o dużym natężeniu ruchu (rozdział 1).
2. Zdefiniowano obszar o dużym natężeniu ruchu (rozdział 2.1).
3. Zdefiniowano system wspomaganie decyzji na morzu (rozdział 2.2).
4. Dokonano przeglądu aktualnie dostępnych systemów wspomaganie decyzji rozszerzających funkcjonalność systemów VTS (rozdział 2.3). Metody te podzielono na:
 - a. Systemy wspomaganie decyzji wyznaczające ścieżki przejść wykorzystujące systemy ekspertowe (rozdział 2.3.1).
 - b. Systemy wspomaganie decyzji wykorzystujące deterministyczne metody wyznaczania ścieżek przejść (rozdział 2.3.2).
 - c. Inteligentny system transportowy (rozdział 2.3.3).
5. Dokonano przeglądu metod wyznaczania ścieżek przejść na morzu (rozdział 3). Przegląd zawiera:
 - a. Metody wyznaczania manewru unikania kolizji, który stanowi element procesu wyznaczania ścieżek przejść na morzu (rozdział 3.2).
 - b. Metody wyznaczania bezpiecznych ścieżek przejść, które podzielono na:
 - i. Metody deterministyczne (rozdział 3.3.1).
 - ii. Metody heurystyczne (rozdział 3.3.2).
6. Opisano metodę ewolucyjną oraz jej rozszerzenia, które zostały wykorzystane w algorytmie hEP/N (rozdział 4).
7. Dokonano przeglądu ewolucyjnych metod wyznaczania ścieżek przejść na morzu (rozdział 4.5).
8. Opracowano hierarchiczną ewolucyjną metodę wyznaczania ścieżek przejść (rozdział 5). W opisie metody wyszczególniono:
 - a. Wymagane dane wejściowe (rozdział 5.1).
 - b. Wyznaczanie pozycji statków w hierarchii (rozdział 5.2).
 - c. Wyznaczanie zbioru bezpiecznych ścieżek przejść (rozdział 5.3).
 - d. Realizację wyznaczonego zbioru bezpiecznych ścieżek przejść (rozdział 5.4).
 - e. Porównanie hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść z metodą ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii statków (rozdział 5.5).

9. W celu zbadania poprawności hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść zbadano dziewięć scenariuszy testowych (rozdział 6), które uwzględniały:
 - a. Sytuację kolizyjną dwóch statków na kursie przecinającym (rozdział 6.2).
 - b. Sytuację kolizyjną trzech statków (rozdział 6.3).
 - c. Omijanie przeszkody statycznej przez trzy statki (rozdział 6.4).
 - d. Sytuację kolizyjną w kanale (rozdział 6.5).
 - e. Sytuację kolizyjną podczas wyprzedzania jednostek (rozdział 6.6).
 - f. Manewr wyprzedzania wielu statków (rozdział 6.7).
 - g. Przykładowe odwzorowanie rzeczywistej implementacji systemu opartego na algorytmie hEP/N (rozdział 6.8).
 - h. Porównanie hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść z metodą ewolucyjnych zbiorów bezpiecznych trajektorii (rozdział 6.9).
10. Przedstawiono podsumowanie wniosków z badań (rozdział 6.10)

Potwierdzono postawioną w pracy tezę. Przeprowadzone badania wykazały, że algorytm hEP/N wyznacza bezpieczne ścieżki przejść dla obiektów w obserwowanym środowisku w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Oznacza to zatem potencjalne zwiększenie bezpieczeństwa obserwowanego obszaru w przypadku zastosowania proponowanej metody.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły osiągnięcie realizacji wszystkich postawionych celów.

Autor zamierza dalej rozwijać algorytm hEP/N w kierunku możliwego wykorzystania w warunkach rzeczywistych. Wymaga to jednak rozszerzenia algorytmu hEP/N o następujące elementy:

- integracja algorytmu z mapami ECDIS – algorytm hEP/N w warunkach rzeczywistych powinien korzystać z elektronicznych map nawigacyjnych, co pozwoli na dokładne odwzorowanie obserwowanego środowiska,
- automatyzacja pobierania danych z systemu AIS,
- integracja z systemem ARPA, mająca na celu zastąpienie komunikacji radiowej między operatorem systemu VTS a decydującym. W takim przypadku możliwe byłoby przekazywanie drogą elektroniczną wyznaczonych ścieżek przejść bezpośrednio na odpowiednie ekrany statków znajdujących się w obserwowanym środowisku,
- możliwość zmiany rozmiaru środowiska – W warunkach rzeczywistych konieczne jest wykorzystanie dynamicznego rozmiaru środowiska algorytmu hEP/N. Zmiana ta wiązać się będzie również z koniecznością skalowania domeny bezpiecznej statków w zależności od rozmiaru środowiska,
- uwzględnienie właściwości dynamicznych i wymiarów statków w procesie poszukiwania ścieżki – w wersji badawczej przyjęto stałe wymiary domeny bezpiecznej dla każdego statku. Możliwe jest jednak opracowanie mechanizmu, który wyznaczałby unikalną domenę bezpieczną dla każdego statku znajdującego się w obserwowanym obszarze w zależności od jego właściwości dynamicznych. Potrzebne dane mogą zostać pobrane z systemu AIS lub też z baz danych systemów VTS,
- wprowadzenie równoległego wyznaczania ścieżek – pozwoli to na wybór najlepszego rozwiązania ze zbioru wyznaczonych zbiorów bezpiecznych ścieżek przejść,
- zmiana sposobu wyznaczania ścieżek przejść – obecnie algorytm wyznacza jedynie ścieżki, które w sposób ograniczony uwzględniają dynamikę statku. Prowadzone są jednak badania

mające na celu wyznaczenie rzeczywistych trajektorii w algorytmie $\mathfrak{H}EP/N++$ (Kolendo 2015). Opracowaną metodę można potencjalnie wykorzystać w algorytmie hEP/N.

- uwzględnienie warunków hydrometeorologicznych w środowisku algorytmu hEP/N – uwzględniające danych hydrometeorologicznych przy wyznaczaniu ścieżek pozwoliłoby algorytmowi hEP/N wyznaczać ścieżki przejść, które omijają rejony niekorzystnych warunków hydrometeorologicznych.

8 Bibliografia

Abramowicz-Gerigk T., Burciu Z., 2009, *Systemy bezpieczeństwa i obsługi autostrady morskiej*, Transport 70, Prace Politechniki Warszawskiej, str. 5-19, Warszawa.

Adamczyk-Kotarska G., 2006, *Wprowadzenie systemu AIS jako efektywnego źródła informacji nawigacyjnej*, Biuro Hydrograficzne Marynarki Wojennej, Przegląd Hydrograficzny nr 2.

Alba E., Dorronsoro B., 2004, *Solving the vehicle routing problem by using cellular genetic algorithms*, Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, Springer Berlin Heidelberg, str. 11-20.

Alabsi F., Naoum R., 2012, *Comparison of selection methods and crossover operations using Steady State Detection System*, Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, Tom 3, 7, str. 1053-1058.

Arabas J., 2004, *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*, WNT, Warszawa.

Bailey N., 2005, *Training, technology and AIS: looking beyond*, Proceedings of the Seafarers International Research Centre's, 4th International Symposium Cardiff University, Cardiff, str. 128.

Baltic Master Report Milestone II part 2/4 – Antoniewicz M., Artyszuk J., Bąd J., Gucma L., Gumca M., Gucma S., Hajduk J., Jankowski S., Juszkievicz W., Pietrzykowski Z., Przywarty M., Tomczak A., Zalewski P., 2006, *General assumptions of the ship safety on southern and western Baltic sea*, Report (M II part 2/4), Maritime University of Szczecin, Szczecin.

Banachowicz A., Wolejsza P., 2008, *Calculation accuracy of safe course made good in an anticollision system*, Transport Problems, 3, str. 89-94.

Becerra V. M., 2001, *Genetic algorithms for optimal control of beer fermentation*, Intelligent Control, 2001. (ISIC '01). Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on, str. 391–396.

Belding T. C., 1995, *The distributed genetic algorithm revisited*, arXiv preprint adap-org/9504007.

Benjamin M. R., 2002, *Multi-objective autonomous vehicle navigation in the presence of cooperative and adversarial moving vehicles*, OCEANS'02 MTS/IEEE. Vol. 3. IEEE, str. 1878-1885.

Benjamin M. R., Curcio J. A., 2004, *COLREGS-based navigation of autonomous marine vehicles*, Proceedings of Autonomous Underwater Vehicles, str. 32-39.

Błuś M., 2004, *Taranowanie opodal Hammer Ode*, Morza, Statki i Okręty, 3/2004, Magnum X Sp. z o.o.

Borovska P., Lazarova M., 2007, *Migration policies for island genetic models on multicompeter platform*, Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 2007. IDAACS 2007 - 4th IEEE Workshop, str. 143-148.

Bovet D. P., Crescenzi P., 1994, *Introduction to the Theory of Complexity*, London: Prentice Hall.

Branke J., 2012, *Evolutionary optimization in dynamic environments (Vol. 3)*, Springer Science & Business Media.

- Bugajski D., 2009**, *Prawa żeglugowe okrętu w świetle prawa międzynarodowego*, Wydawnictwo Naukowe Scholar.
- Burger W., M., 1983**, *Radar Observer's Handbook for Merchant Navy Officers*, Brown, son and Ferguson, Glasgow.
- Burns R. S., 1999**, *An intelligent automatic guidance system for surface ships*, 2nd IFAC Workshop Control Applications In Marine Systems, Genova, Italy.
- Cannell W. P., 1981**, *Collision avoidance as a game of co-ordination*, The Journal of Navigation, 34, str. 220-239.
- Chang K.-Y., Eu Jan G., Parberry I., 2003**, *A method for searching optimal routes with collision avoidance on raster charts*, The Journal of Navigation, 56, str. 371-384.
- Chen S., Ahmad R., Lee B. G., Kim D., 2014**, *Composition ship collision risk based on fuzzy theory*, Journal of Central South University, 21(11), str. 4296-4302.
- Chien-Min S., Ki-Yin C., Chih-Yung C., 2012**, *Fuzzy decision on optimal collision avoidance measures for ships in vessel traffic service*, Journal of Marine Science and Technology, 2012, 20.1. str. 38-48.
- Chodak G., Kwaśnicki W., 2002**, *Zastosowanie algorytmów genetycznych w prognozowaniu popytu*, Gospodarka Materiałowa i Logistyka, 4, str. 2-7.
- Chromiec J., Strzemienna E., 1994**, *Sztuczna inteligencja. Metody konstrukcji i analizy systemów eksperckich*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa.
- Churkin V. I., Zhukov Y. I., 1998**, *Procedures for ship collision avoidance*, OCEANS'98 Conference Proceedings. Vol. 2. IEEE, str. 857-860.
- Cockcroft A. N., 1972**, *A manoeuvring diagram for avoidance collisions at sea*, Journal of Navigation, vol. 25.
- Cockcroft A. N., Lameijer J. N. F., 2001**, *A guide to the collisions avoidance rules*, Butterworth-Heinemann, United Kingdom.
- Coenen F. P., Smeaton G. P., Bole A. G., 1989**, *Knowledge-based collision avoidance*, The Journal of Navigation, 42, str. 107-116.
- Colley B. A., Curtis R. G., Stockel C. T., 1983**, *Manoeuvring times, domains and arenas*, The Journal of Navigation, 36, str. 324-328.
- Colley B. A., Curtis R. G., Stockel C. T., 1984**, *On marine traffic flow and collision avoidance computer simulation*, The Journal of Navigation 37, str. 232-250.
- Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C., 2001**, *Introduction to algorithms*, Vol. 2, Cambridge: MIT press, str. 531-549.
- Czarny W., Wawruch R., 2008**, *Międzynarodowa Organizacja Morska – zadania, struktura organizacyjna i metody pracy*, Przegląd Hydrograficzny, nr 4, str. 129-14.

- Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A., 2002**, *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*, Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 6(2), str. 182-197.
- Dechter R., Pearl J., 1985**, *Generalized best-first search strategies and the optimality of A**, Journal of the ACM (JACM), 32(3), str. 505-536.
- Degre' T., Lefe`vre X., 1981**, *A collision avoidance system*, The Journal of Navigation, 34, str. 294-302.
- Denzinger J., Kidney J., 2003**, *Improving migration by diversity*, In Evolutionary Computation, CEC'03, The 2003 Congress on Vol. 1, IEEE, str. 700-707.
- Dove M. J., Burns R. S., Stockel C. T., 1986**, *An automatic collision avoidance and guidance system for marine vehicles in confined waters*, The Journal of Navigation, 39, str. 180-190.
- Drozd W., Dziewicki M., Waraksa M., Bibik L., 2007**, *Operational status of Polish AIS network, Advances in marine navigation and safety of sea transportation*, 7th International Symposium TransNav, Gdynia Maritime Academy, Gdynia, str. 195-198.
- Dulęba I., 2001**, *Metody i algorytmy planowania ruchu robotów mobilnych i manipulacyjnych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT.
- Eriksen, T., Høye, G., Narheim, B., Meland, B. J., 2006**, *Maritime traffic monitoring using a space-based AIS receiver*, Acta Astronautica, 58(10), str. 537-549.
- Fayyad U. M., Piatetsky-Shapiro G., Smyt P., Uthurusamy R., 1996**, *Advances in knowledge discovery and data mining*, Lecture Notes in Computer Science 5476.
- Felski A., Jaskólski K., 2010**, *Problem niezdatności informacyjnej systemu AIS*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, 51, str. 77-87.
- Felski A., Jaskólski K., 2012**, *Information unfitness as a factor constraining Automatic Identification System (AIS) application to anti-collision manoeuvring*, Polish Maritime Research, 19(3), str. 60-64.
- Figielska E., 2006**, *Algorytmy ewolucyjne i ich zastosowani*, Zeszyty Naukowe 81, str. 92.
- Fogel D. B., 1997**, *The Advantages of Evolutionary Computation*, BCEC, str. 1-11.
- Fujii Y., Tanaka K., 1971**, *Traffic capacity*, The Journal of Navigation, 24, str. 543-552.
- Gandhi S., Khan D., Solanki V. S. A., 2012**, *Comparative analysis of selection scheme*, International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), Volume-2, Issue-4, September 2012, str. 131-34.
- Gawrychowski A., Śmierchalski R., 1984a**, *Algorithm of optimal ship handling for avoiding collision at sea*, 14th Internatinalne Tagung-Automatisierung Schiffbau, Warnemunde, str. 79-87.
- Gawrychowski A., Śmierchalski R., 1984b**, *Modele gry różniczkowej w procesie unikania kolizji statków na morzu*, Zeszyty Naukowe WSM, Gdynia, str. 34-43.
- Goldberg D. E., 1995**, *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.

Goodwind E. M., 1975, *A statistical study of ship domains*, Journal of Navigation, Vol. 31, str. 328-344.

Gucma M., Chrzanowski J., Jankowski S., Montewka J., Przywarty M., Juszkievicz W., 2010, *Urządzenia radarowe w praktyce nawigacyjnej*, Lulu.com.

Jackson P., 1986, *Introduction to expert systems*, Addison-Wesley Pub. Co., Reading, MA.

Harati-Mokhtari A., Wall A., Brooks P., Wang J., 2007, *Automatic Identification System (AIS): data reliability and human error implications*, Journal of navigation, 60(03), str. 373-389.

Hollingdale S. H., 1961, *The mathematics of collision avoidance in two dimensions*, The Journal of Navigation, 14, str. 243-261.

Hong X., Harris C. J., Wilson P. A., 1999, *Autonomous ship collision free trajectory navigation and control algorithms*, Emerging Technologies and Factory Automation, 1999, Proceedings. ETFA'99. 1999 7th IEEE International Conference on. Vol. 2, IEEE, str. 923-929.

Hopgood A., Mierzejewska A., 2009, *Transform ranking: a new method of fitness scaling in genetic algorithms*, Research and Development in Intelligent Systems XXV, Springer London, str. 349-354.

Hwang C.-N., Yang J.-M., Chiang C.Y., 2001, *The design of fuzzy collision avoidance expert system implemented by h1-autopilot*, Journal of Marine Science and Technology 9, str. 25-37.

Hwang C.-N., 2002, *The integrated design of fuzzy collision-avoidance and h1-autopilots on ships*, The Journal of Navigation, 55, str. 117-136.

IALA, 2001, Guidelines on AIS as a VTS tool,
<http://www.sfm.org/ais/webdocs/IalaAISasVTStool.pdf>.

Iijima Y., Hayashi S., 1991, *Study towards a twenty – first century intelligent ship*, The Journal of Navigation, 44, str. 184-193.

IMO, 1979, *Preference Standards for Automatic Radar Plotting Aids (ARPA)*, Resolution A. 422 (XI), November 1979.

IMO, 1997, *Guidelines for Vessel Traffic Services*, A.857 (20).

IMO, 2002, *Międzynarodowa konferencja o bezpieczeństwie życia na morzu, 1974, Solas, Tekst ujednolicony 2002*, Polski Rejestr Statków, Gdańsk.

Ito M., Zhang F., Yoshida N., 1999, *Collision avoidance control of ship with genetic algorithm*, Control Applications, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Vol. 2, IEEE, str. 1791-1796.

Itoh H., Numano M., Pedersen M., 2003, *Modelling and simulation of sea traffic and a visualization-based collision avoidance support system*, Proc. of International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2003), Townsville, Australia.

Kapliński O., 1997, *Modelling of construction processes: A managerial approach*, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki.

Jagniszczak I., 2001, *Multilevel program of information integration in VTMS systems in relation shore-ship/barge-shore*, IX International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineering, Szczecin Maritime University, Szczecin.

James M. K., 1986, *Modelling the decision process in computer simulation of ship navigation*, The Journal of Navigation, 39, str. 32-48.

Jaworski B., Kolendo P., Kuczkowski Ł., Śmierchalski R., 2012, *Evolutionary hierarchical agent decision support system for marine traffic coordination*, Manoeuvring and Control of Marine Craft, Volume 9/1, str. 25-30.

Jereczek D., Kurowski A., Kryger P., 2014, *Współczesne systemy elektroniki morskiej – materiały do wykładu*, Gdańsk.

Jones K. D., 1974, *Application of a manoeuvre diagram to multi-ship encounters*, The Journal of Navigation, 27.01 (1974), str. 19-27.

Jurdziński M., 2006, *Podstawy nawigacji morskiej*, Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia.

Khalib O., 1995, *Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots*, International Journal of Robotics Research, Tom V, 1, str. 90-98.

Kolendo P., Jaworski B., Śmierchalski R., 2011a, *Comparison of selection schemes in evolutionary method of path planning*, Computational Collective Intelligence. Technologies and Applications, Springer Berlin Heidelberg, str. 241-250.

Kolendo P., Jaworski B., Śmierchalski R., 2011b, *Fitness function scaling in the evolutionary method of path planning*, Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on, IEEE, str. 1989-1994.

Kolendo P., Jaworski B., Kuczkowski Ł., Śmierchalski R., 2014, *Selection pressure in the evolutionary path planning problem*, Intelligent Systems in Technical and Medical Diagnostics, Springer Berlin Heidelberg, str. 523-534.

Kolendo P., Śmierchalski R., 2015, *Ship Evolutionary Trajectory Planning Method with Application of Polynomial Interpolation*, 11th International Symposium TransNav, Gdynia Maritime Academy, Gdynia.

Kopacz Z., Morgaś W., Urbański J., 2007, *Europejski system monitoringu ruchu statków i informacji*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, Rok XLVIII nr 3 (169) 2007, str. 41-58.

Kuczkowski Ł., Kolendo P., Jaworski B., Śmierchalski R., 2012, *Mean crossover in evolutionary path planning method for maritime collision avoidance*, Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie, str. 70-77.

Kuczkowski Ł., Śmierchalski R., 2014, *Selection pressure in the evolutionary path planning problem*, Intelligent Systems in Technical and Medical Diagnostics, Springer Berlin Heidelberg, str. 523-534.

Kudriaszow W.E., Lisowski J., 1979, *Model gry pozycyjnej w zastosowaniu do syntezy bezpiecznego sterowania statkiem*, *Archiwum Automatyki i Telemekhaniki*.

Lazarowska A., 2013, *Planowanie trasy przejścia statku z zastosowaniem algorytmu mrówkowego*, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej*, nr 78, Marzec 2013, str. 43-52.

Lee H.-J., Key P. R., 2001, *Development of collision avoidance system by using expert system and search algorithm*, *International shipbuilding progress* 48.3, str. 197-212.

Lee Y.-I., Kim Y.-G., 2004, *A collision avoidance system for autonomous ship using fuzzy relational products and COLREGs*, *Intelligent Data Engineering and Automated Learning–IDEAL 2004*, Springer Berlin Heidelberg, 2004, str. 247-252.

Lisowski J., 1978, *A differential game model of ship control process*, 7th World Congress IFAC, Helsinki, str. 1557-1603.

Lisowski J., 1981, *Okrętowe systemy antykolizyjne*, Tom 8 z *Elektrotechnika i Elektronika Okrętowa*, Wydawnictwo morskie, Gdynia.

Lisowski J., 2001, *Determining the Optimal Ship Trajectory in Collision Situation*, *Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineering*, Szczecin, str. 192-201.

Lisowski J., 2013, *Metody komputerowego wspomaganie decyzji manewrowej nawigatora w sytuacjach kolizyjnych*, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, R. 54 nr 1 (192), str. 67-78.

Liu Y., Shi C.-J., 2005, *A fuzzy-neural inference network for ship collision avoidance*, *Proceedings of the 4th international conference on machine learning and cybernetics*, Guangzhou, China, str. 4754-4759.

Makowski M., 2001, *Multi-objective decision support including sensitivity analysis*, *International Institute for Applied Systems Analysis*, Austria, str. 21-22.

Marine Accident Investigation Branch, 2006, *Report on the investigation of the collision between Lykes Voyager and Washington Senator Taiwan Strait 8 April 2005*, Report 4/2006.

Master B., 2006, *General assumptions of the ship safety on southern and western Baltic sea*, Report (M II part 2/4), Maritime University of Szczecin.

Maza M. D. L., Tidor B., 1991, *Boltzmann weighted selection improves performance of genetic algorithms*, (No. AIM-1345), Massachusetts institute of tech, Cambridge artificial intelligence lab.

Mazaheri A., Goerlandt F., Montewka J., Kujala P., 2011, *A decision support tool for VTS centers to detect grounding candidates*, *Transport Systems and Processes: Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 153, str. 153-158.

Merz A. W., Karmakar J. S., 1976, *Collision avoidance systems and optimal turn manoeuvres*, *The Journal of Navigation*, 29, str. 160-174.

Michalewicz Z., 1996, *Genetic algorithms+ data structures= evolution programs*, springer.

- Miguel A. Castaneda P., Savage J., Hernandez A., Cosio F.A., 2008**, *Local autonomous robot navigation using potential fields*, WWW – <http://cdn.intechopen.com/pdfs/5350.pdf>.
- Miloh T., Sharma S.D., 1997**, *Maritime collision avoidance as a differential game*. Schiffstechnik, 24(116).
- Mitrofanov O., 1968**, *An anti-collision indicator*, The Journal of Navigation, 21, str. 163-170.
- Ming-Cheng T., Chao-Kuang H., 2010**, *The study of ship collision avoidance route planning by ant colony algorithm*, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 18, No. 5, str. 746-756.
- Morrel J. S., 1961**, *The physics of collision at sea*, The Journal of Navigation, 14, str. 163-184.
- Moszkowicz S. 2008**, *Meteorologia radarowa w IMGW– pół wieku osvajania „diabła“ na dachu*, Gazeta Obserwatora IMGW nr. 3-4, 2008.
- Noever D., Baskaran S., 1992**, *Steady state vs. generational genetic algorithms: A comparison of time complexity and convergence properties*, Preprint series, str. 92-07.
- Nomoto K., Taguchi K., Honda K., Hirono S., 1956**, *On the steering qualities of ships*, J. of Naval Architects of Japan, 99.
- Numano, M., 1987**, *Real time simulation system for automatic ship navigation.*, International Conference on Marine Simulation (MARSIM), 4th. 1900.
- Oduguwa V., Tiwari A., Roy R., 2005**, *Evolutionary computing in manufacturing industry: an overview of recent applications*, Applied Soft Computing, 5(3), str. 281-299.
- Papi F., Tarchi D., Vespe M., Oliveri F., Borghese F., Aulicino G., Vollero A., 2014**, *Radiolocation and tracking of automatic identification system signals for maritime situational awareness*, IET Radar, Sonar & Navigation, str. 568-580.
- Patraiko D., Wake P., Weintrit A., 2010**, *e-Navigation and the human element*, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, volume 4, number 1.
- Pedersen E., Inoue K., Tsugane M., 2002**, *Evaluation of a radar plot and display technique for anti-collision assessment of multiple targets in true vector representation by application of the environmental stress model*, The Journal of Japan Institute of Navigation 2002 (106). ISSN 0388-7405. str. 1-12.
- Pena-Reyes C. A., Sipper M., 1999**, *A fuzzy-genetic approach to breast cancer diagnosis*, Artificial intelligence in medicine, 17(2), str. 131–155.
- Pena-Reyes C. A., Sipper M., 2000**, *Evolutionary computation in medicine: an overview*, Artificial Intelligence in Medicine, 19(1), str. 1–23.
- Perera L. P., Carvalho J. P., Guedes Soares C., 2009a**, *Decision making system for the collision avoidance of marine vessel navigation based on COLREGs rules and regulations*, In Proceedings of 13th congress of international maritime association of Mediterranean, Istanbul, Turkey, str. 1121-1128.

Perera L. P., Carvalho J. P., Guedes Soares C., 2009b, *Autonomous guidance and navigation based on the COLREGs rules and regulations of collision avoidance*, In Proceedings of the International Workshop, Advanced Ship Design for Pollution Prevention, str. 205-216.

Phillips R., 1975, *The avoidance of accident at sea*, The Journal of Navigation, 28, str. 66–76.

Pietrzykowski Z., 2004, *Modelowanie procesów decyzyjnych w sterowaniu ruchem statków morskich*, Studia / Akademia Morska w Szczecinie, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, str. 10.

Pietrzykowski Z., 2011, *Navigational decision support system as an element of intelligent transport systems*, Scientific Journals Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, str. 41-47.

Popovich V., Claramunt C., Osipov V., Ray C., Wang T., Berbenev D., 2009, *Integration of vessel traffic control systems and geographical information systems*, WWW http://www.corp.at/archive/CORP2009_28.pdf.

Rothblum A., 2000, *Human error and marine safety*, Maritime Human Factors Conference, Linthicum, MD.

Russell S., Norvig P., 2010, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Prentice Hall.

Rymarz W., 1995, *Podręcznik międzynarodowego prawa drogi morskiej*, Trademar.

Rymarz W., 2004, *Międzynarodowe prawo drogi morskiej – w zarysie*, Trademar.

Sadjadi F., 2004, *Comparison of fitness scaling functions in genetic algorithms with applications to optical processing*, Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting, International Society for Optics and Photonics, str. 356–364.

Sharpey-Schafer J. M., 1955, *Collision at sea*, The Journal of Navigation, 8, str. 261–280.

Sivaraj R., Ravichandran T., 2011, *A review of selection methods in genetic algorithm*, International journal of engineering science and technology, 3(5), str. 3792–3797.

Stadnicki J., 2006, *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji z przykładami zastosowań technicznych*, Warszawa: WNT.

Smeaton G. P., Coenen F. P., 1990, *Developing an intelligent marine navigation system*, Computing & Control Engineering Journal (Volume: 1, Issue: 2), Marzec, str. 95–103.

Stawicki K., 2008, *Modelowanie manewru ostatniej chwili w sytuacji kolizyjnej na morzu*, Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni, str. 80–91.

Stupak T., Wawruch R., 2007, *AIS jako narzędzie do monitorowania ruchu morskiego*, Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni, str. 82–88.

Su C. M., Chang K. Y., Cheng C. Y., 2012, *Fuzzy decision on optimal collision avoidance measures for ships in vessel traffic service*, Journal of Marine Science and Technology, 20(1), str. 38–48.

Suh J. Y., Van Gucht D., 1987, *Distributed genetic algorithms*, Computer Science Department, Indiana Univ.

- Svetak J., 2003**, *Analysis of the causes of maritime casualties*, Promet 15.1 (2003), str. 43–48.
- Szlapczyńska J., 2006**, *Multi criteria route selection with custom domain shape*, Annual of Navigation, str. 123–136.
- Szlapczyński R., 2006**, *A new method of ship routing on raster grids, with turn penalties and collision avoidance*, Journal of Navigation, 59(01), str. 27–42.
- Szlapczyński R., 2009**, *Solving multi-ship encounter situations by evolutionary sets of cooperating trajectories*, Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, str. 437.
- Szlapczyński R., Szlapczyńska J., 2012a**, *On evolutionary computing in multi-ship trajectory planning*, Applied Intelligence, 37(2), str. 155–174.
- Szlapczyński R., Szlapczyńska J., 2012b**, *Customized crossover in evolutionary sets of safe ship trajectories*, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 22, str. 999–1009.
- Śmierchalski R., 1993**, *Optymalizacja bezpiecznej trajektorii statku w sytuacji spotkania większej liczby obiektów ruchomych*, IV Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna Automatyzacja Nawigacji i Systemów Sterowania, Gdynia.
- Śmierchalski R., 1997**, *Nawigacyjny problem unikania kolizji na morzu jako adaptacyjne modelowanie trajektorii statku*, Proceedings of the 2nd National Conference on Evolutionary Computation and Global Optimization, Warsaw University of Technology Publishing House, Ryto.
- Śmierchalski R., 1997b**, *Trajectory planning for ship in collision situations at sea by evolutionary computation*, 4th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Brijuni, str. 105–110.
- Śmierchalski R., 1997c**, *Dynamic aspect in evolutionary computation on example of avoiding collisions at Sea*, 4th International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje.
- Śmierchalski R., 1998**, *Synteza metod i algorytmów wspomagania Decyzji Nawigatora w sytuacji kolizyjnej*, Prace Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Wydaw. Uczelniane WSM, Gdynia.
- Śmierchalski R., Michalewicz Z., 1998**, *Adaptive modelling of a ship trajectory in collision situations at sea*, Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference, IEEE, str. 342–347.
- Śmierchalski R., 1999**, *Evolutionary trajectory planning of ships in navigation traffic areas*, Journal of marine science and technology, 4(1), str. 1–6.
- Śmierchalski R., Michalewicz Z., 2005**, *Path planning in dynamic environments*, Innovations in Robot Mobility and Control, Springer Berlin Heidelberg, str. 135–153.
- Światowa Konferencja Radiokomunikacyjna, 2012**, *Regulamin Radiokomunikacyjny ITU. Załącznik S 18: „Table of transmitting frequencies in the VHF maritime mobile band”*.
- Świerczyński S., Czaplewski K., 2012**, *Pozyskiwanie informacji nawigacyjnej na potrzeby systemów VTS*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, NR 3 (190) 2012, str. 113–121.

Tam C., Buckmall R., Greig A., 2009, *Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters*, The Journal of Navigation, 62, str. 455–476.

Tanese R., 1987, *Parallel genetic algorithms for a hypercube*, *Genetic Algorithms and Their Applications: proceeding of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, San Mateo, str. 434–439.

Trawicki D., Urbowska W., 2007, *Algorytmy hybrydowe optymalizacji w zastosowaniu do problemu sterowania systemami dystrybucji wód*, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, Wydawnictwo PAK, R. 53, nr 4, str. 1–20.

Tsou M. C., Kao S. L., Su C. M., 2010, *Decision support from genetic algorithm for ship collision avoidance route planning and alerts*, The Journal of Navigation, Vol. 63, No. 1, str. 1–16.

Urbański J., Weintritt A., 2006, *Elektroniczna mapa nawigacyjna – dwadzieścia lat później*, *Przełęcz Hydrograficzny* Nr 2, str. 33–51.

Urząd Morski w Gdyni, 2008, *Zarządzenie porządkowe Nr 3 dyrektora urzędu morskiego w Gdyni – Przepisy Służby Kontroli Ruchu Statków (Służby VTS)*.

Wall M., 1996, *GAlib: A C++ library of genetic algorithm components*, Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 87, str. 54.

Wang L., Maciejewski A. A., Siegel H. J., Roychowdhury V. P., 1998, *A comparative study of five parallel genetic algorithms using the traveling salesman problem*, *Parallel Processing Symposium, 1998, IPPS/SPDP 1998, Proceedings of the First Merged International and Symposium on Parallel and Distributed Processing 1998, IEEE*, str. 345–349.

Wawruch R., 2002, *Uniwersalny statkowy system automatycznej identyfikacji (AIS)*, Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni.

Wawruch R., Stupak T., 2007, *Analiza zastosowań AIS do unikania zderzeń*, *Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni*, nr 21, str. 89–100.

Wawruch R., 2008, *Znowelizowane wymagania techniczno-eksploatacyjne dla radarowych urządzeń statkowych. Część 2 – wymagania dotyczące układów śledzących, zasad prezentacji informacji z AIS i map elektronicznych oraz dokumentacji producenta*, *Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni*, nr 20.

Wepster A., 1969, *The future of merchant marine navigation*, The Journal of Navigation, 22, str. 92–107.

Wilson P. A., Harris C. J., Hong X., 2003, *A line of sight counteraction navigation algorithm for ship encounter collision avoidance*, The Journal of Navigation, 56, str. 111–121.

Wróbel F., 2009, *Vademecum nawigatora*. Wydawnictwo Trademar.

Wylie F. J., 1960, *The Calvert methods of manoeuvring to avoid collision at sea and of radar display*, *Journal of Navigation*, 13(04), str. 455–464.

Wylie F. J., 1962, *Mathematics and the collision regulations*, The Journal of Navigation, 15, str. 104–112.

Vivekanandan P., Nedunchezian R., 2010, *A new incremental genetic algorithm based classification model to mine data with concept drift*, Journal of Theoretical & Applied Information Technology 21.1 (2010).

Xiao J., Michalewicz Z., Zhang L., Trojanowski K., 1997, *Adaptive evolutionary planner/navigator for mobile robots*, Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 1(1), str. 18–28.

Xiao-Min H., Jun Z., Yun L., 2008, *Orthogonal methods based ant colony search for solving continuous optimization problems*, Journal Of Computer Science And Technology 23(1), str. 2–18.

Ying S., Shi C., Yang S., 2007, *Ship route designing for collision avoidance based on Bayesian genetic algorithm*, Control and Automation, 2007. ICCA 2007. IEEE International Conference, IEEE, str. 1807–1811.

Yu Y., Schell M. C., Zhang J. Y., 1997, *Decision theoretic steering and genetic algorithm optimization: application to stereotactic radiosurgery treatment planning*, Medical Physics, 24(11), str. 1742–1750.

Zadeh L. A., 1965, *Fuzzy sets*, Information and Control 8 (3), str. 338–353.

Zakirul B., 2012, *ECDIS display, safety settings and alarm management*, The 14th IAIN Congress 2012 – Seamless Navigation (Challenges & Opportunities), Kair.

Zhao J., Wang P., Wu Z.V., 1992, *The development of ship collision avoidance automation*, The Journal of Navigation, 42, str. 107–113.

Ziarati R., 2006, *Safety at sea – Applying pareto analysis*, Proceedings of World Maritime Technology Conference (WMTC 06), Queen Elizabeth Conference Centre.

Ziarati R., 2007, *Collisions and groundings – major causes of accidents at sea*, WWW <http://www.marifuture.org/Publications/Papers.aspx>.

Ziarati R., 2014, *Avoiding collisions at sea*, WWW <http://www.marifuture.org/Publications/Articles.aspx>.

Zou X.-H., Ni T.-Q., 2006, *Applied research of genetic algorithm in the amplitude decision of ship steering and collision avoidance*, Shipboard Electronic Countermeasure, China, 29(3), str. 66–69.

Żak S., Łukasik S., 2006, *Zastosowanie równoległych algorytmów genetycznych do rozwiązywania problemów przestrzennej alokacji zasobów*, Krakowska Konferencja Młodych Uczonych, str. 21–23.

WWW – AIS, <http://www.marinetraffic.com/>.

WWW – BSL, <http://bestsailing.eu/files/sendfile.php?Product=ARPA%20BS.pdf&DownloadID=33>.

WWW – COLREG, <http://www.uraz.pl/klub/MPDM.pdf>.

WWW – DIM, http://www.dma.dk/SiteCollectionDocuments/OKE/List-marine-accident-reports-per-year/FU_shan_hai_gdnynia.pdf.

WWW – GM, <http://maps.google.com/>.

WWW – IGK, <http://www.igik.edu.pl/pl/geodezja-i-geodynamika-sieci-permanentne-gnss>.

WWW – JRC, <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/new-method-verify-reported-vessel-positions>.

WWW – LM, http://www.aerothai.co.th/thai/anou_file/12084282550092.pdf.

WWW – PRT, <http://protege.stanford.edu/products.php>.

WWW – SFS, <http://www.safety4sea.com/non-compliance-with-colregs-in-north-sea/>

WWW – SJO, http://www.sjofartsverket.se/upload/1486/a171_2.pdf.

WWW – VTS, <http://www.mereblog.com/2005/12/06/malmo-vts-centre/>.

9. Dodatki

9.1 Definicje

1. Statek o ograniczonej zdolności manewrowej – Określenie to oznacza statek, którego zdolność do manewrowania zgodnie z wymaganiami prawideł COLREG jest ograniczona ze względu na charakter jego pracy i który dlatego nie może ustąpić z drogi innemu statkowi (WWW – COLREG). Określenie "statek o ograniczonej zdolności manewrowej" obejmuje, ale nie ogranicza się do następujących statków:
 - o statek zajęty układaniem, obsługą lub podnoszeniem znaku nawigacyjnego, podwodnego kabla lub rurociągu;
 - o statek zajęty pracami pogłębiarskimi, hydrograficznymi lub podwodnymi,
 - o statek w drodze zajęty zaopatrywaniem lub przekazywaniem osób, zapasów lub ładunku,
 - o statek zajęty wodowaniem lub podnoszeniem na pokład samolotów,
 - o statek zajęty oczyszczaniem z min,
 - o statek zajęty taką czynnością holowniczą, która poważnie ogranicza statek holujący oraz obiekt holowany w ich zdolności do odchylania się od ich kursu.
2. Statek nieodpowiadający za swoje ruchy – Statek, który wskutek wyjątkowych okoliczności nie jest w stanie manewrować zgodnie z wymaganiami prawideł COLREG i dlatego nie może ustąpić z drogi innemu statkowi.
3. Statek zajęty połowem – każdy statek łowiący sieciami, sznurami haczykowymi, włokami lub innymi narzędziami połowu, które ograniczają zdolność manewrową; określenie to nie obejmuje statku łowiącego włóczonymi sznurami haczykowymi lub innymi narzędziami połowu, które nie ograniczają zdolności manewrowej.
4. Statek żaglowy – każdy statek pod żaglami pod warunkiem, że urządzenie napędowe, jeżeli jest zainstalowane na statku, nie jest używane.

9.2 Wybrane prawidła COLREG

9.2.1 Prawidło 2

Odpowiedzialność

a) Żadne z postanowień niniejszych prawideł nie zwalnia statku ani jego armatora, kapitana bądź załogi od następstw jakiegokolwiek zaniedbania przestrzegania niniejszych prawideł lub zaniedbania zachowania środków ostrożności, których może wymagać zarówno zwykła praktyka morska, jak i szczególne okoliczności danego wypadku.

b) Przy interpretowaniu i stosowaniu niniejszych prawideł należy uwzględniać wszystkie niebezpieczeństwa żeglugi i zderzenia oraz wszelkie szczególne okoliczności, łącznie z możliwościami danych statków, które w celu uniknięcia bezpośredniego niebezpieczeństwa mogą uczynić konieczne odstępstwo od niniejszych prawideł.

9.2.2 Prawidło 13

a) Bez względu na którekolwiek z postanowień zawartych w prawidłach części B rozdziałów I i II, każdy statek wyprzedzający inny statek powinien ustąpić z drogi statkowi wyprzedzanemu,

b) Za wyprzedzający należy uważać statek zbliżający się do innego statku z kierunku więcej niż 22.5 stopnia z tyłu jego trawersu, to znaczy będący w takiej pozycji w stosunku do statku

wyprzedzanego, że podczas nocy mógłby widzieć tylko światło rufowe tego statku, a nie którekolwiek z jego świateł burtowych.

c) Jeżeli statek ma jakąkolwiek wątpliwość co do tego, czy jest statkiem wyprzedzającym, powinien uznać się za taki statek i działać odpowiednio,

d) Wszelkie następne zmiany zamiaru między dwoma statkami nie mogą uczynić statku wyprzedzającego statkiem przecinającym kurs w rozumieniu niniejszych prawideł lub zwolnić go od obowiązku trzymania się z daleka od statku wyprzedzanego aż do chwili jego ostatecznego wyprzedzenia i oddalenia się.

9.2.3 Prawidło 15

Jeżeli dwa statki o napędzie mechanicznym przecinają swoje kursy w taki sposób, że powoduje to ryzyko zderzenia, wówczas statek, który ma drugi statek ze swej prawej burty, powinien ustąpić mu z drogi i jeżeli okoliczności na to pozwalają unikać przecinania kursu przed jego dziobem.

9.2.4 Prawidło 16

Każdy statek, który zgodnie z niniejszymi prawidłami ma ustąpić z drogi innemu statkowi, powinien w miarę możliwości podjąć zawczasu odpowiednie działania, aby trzymać się w znacznej odległości.

9.2.5 Prawidło 17

Działania statku mającego pierwszeństwo drogi

a)

1. Jeżeli jeden z dwóch statków ma ustąpić z drogi, to drugi statek powinien zachować swój kurs i szybkość,

2. Ten drugi statek może jednak podjąć działanie w celu uniknięcia zderzenia jedynie własnym manewrem, skoro tylko stanie się oczywiste dla niego, że statek obowiązany do ustąpienia z drogi nie podejmuje właściwego działania stosownie do niniejszych prawideł.

b) Jeżeli z jakiegokolwiek przyczyny statek obowiązany do zachowania swego kursu i szybkości znajdzie się tak blisko, że nie można uniknąć zderzenia przez samo tylko działanie statku ustępującego z drogi, wówczas powinien on podjąć działanie, które najlepiej przyczyni się do uniknięcia zderzenia.

c) Statek o napędzie mechanicznym, który w sytuacji przecinania się kursów podejmuje działanie zgodnie z ustępem a/ ii/ niniejszego przepisu w celu uniknięcia zderzenia z innym statkiem, powinien, jeżeli okoliczności na to pozwalają, nie zmieniać kursu w lewo, jeżeli z lewej jego burty znajduje się statek.

d) Niniejsze przepisy nie zwalniają statku mającego ustąpić z drogi od dopełnienia tego obowiązku.

9.2.6 Przepis 18

Jeżeli przepisy 9, 10 i 13 nie stanowią inaczej:

a) Statek o napędzie mechanicznym w drodze powinien ustąpić z drogi;

1. statkowi, który nie odpowiada za swoje ruchy;
2. statkowi o ograniczonej zdolności manewrowej;
3. statkowi zajętemu połowem;
4. statkowi żaglowemu;

b) Statek żaglowy w drodze powinien ustąpić z drogi:

1. statkowi, który nie odpowiada za swoje ruchy;
2. statkowi o ograniczonej zdolności manewrowej;
3. statkowi zajętemu połowem.

c) Statek zajęty połowem w drodze powinien w razie możliwości ustąpić z drogi:

1. statkowi, który nie odpowiada za swoje ruchy;
2. statkowi o ograniczonej zdolności manewrowej;

d)

1. Każdy statek inny niż statek nieodpowiadający za swoje ruchy lub statek o ograniczonej zdolności manewrowej powinien, jeśli okoliczności na to pozwalają, unikać przeszkadzania bezpiecznemu przejściu statku ograniczonego swoim zanurzeniem i pokazującym sygnały przewidziane w przepisie 28;

2. statek ograniczony swoim zanurzeniem powinien nawigować ze szczególną ostrożnością, uwzględniając w pełni swoją szczególną sytuację.

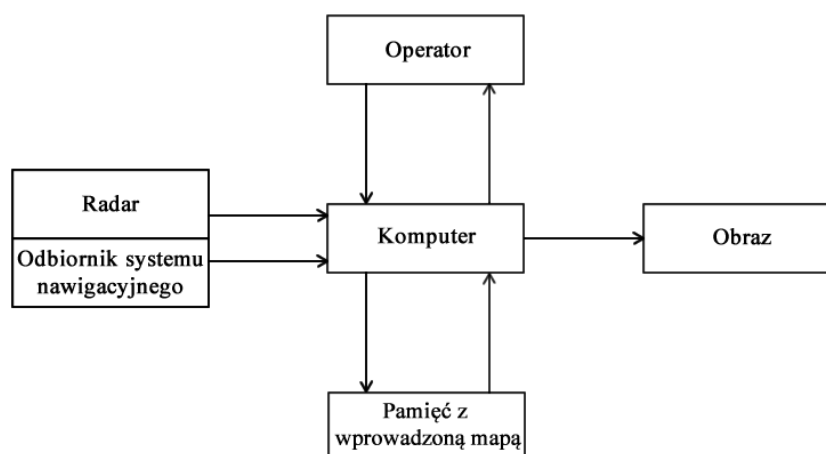
e) Wodnosamolot na wodzie powinien w zasadzie trzymać się w znacznej odległości od wszystkich statków i unikać przeszkadzania im w nawigowaniu. Jeżeli jednak istnieje ryzyko zderzenia, powinien on przestrzegać przepisów niniejszej części.

9.2.7 Prawidło 19

- a) Niniejsze prawidło stosuje się do statków, które nie są wzajemnie widoczne i nawigują w strefie ograniczonej widzialności lub w jej pobliżu.
- b) Każdy statek powinien poruszać się z bezpieczną szybkością, dostosowaną do istniejących okoliczności i warunków ograniczonej widzialności. Statek o napędzie mechanicznym powinien utrzymywać swoje maszyny gotowe do wykonania natychmiastowego manewru.
- c) Każdy statek powinien należycie uwzględniać istniejące okoliczności i warunki ograniczonej widzialności.
- d) Statek, który wykryje tylko za pomocą radaru obecność innego statku, powinien ustalić, czy powstaje sytuacja nadmiernego zbliżenia lub czy istnieje ryzyko zderzenia, a jeżeli tak, to powinien wystarczająco wcześnie podjąć działania zapobiegawcze, z tym, że jeżeli składa się ono ze zmiany kursu, to należy unikać w miarę możliwości:
 - a. zmiany kursu w lewo, jeśli z przodu trawersu znajduje się inny statek nie będący statkiem wyprzedzanym;
 - b. zmiany kursu w kierunku statku na trawersie lub z tyłu trawersu.
- e) Z wyjątkiem przypadku, kiedy uznano, że ryzyko zderzenia nie istnieje, każdy statek, który usłyszy przypuszczalnie przed swego trawersu sygnał mgłowy innego statku lub który nie może uniknąć sytuacji nadmiernego zbliżenia do innego statku będącego przed trawersem, powinien zmniejszyć swą szybkość do minimum koniecznego do utrzymania się na swoim kursie. W razie konieczności powinien zatrzymać się, a w każdym razie nawigować z najwyższą ostrożnością, dopóki niebezpieczeństwo zderzenia nie minie.

9.3 Elektroniczne mapy nawigacyjne - ECDIS

Pojęcie mapy elektronicznej oznacza mapę morską (lub wybrane jej elementy) przedstawioną w postaci cyfrowej i przechowywaną w pamięci komputera, z możliwością wyświetlenia jej na ekranie monitora. W najczęściej spotykanych rozwiązaniach, mapa elektroniczna stanowi zintegrowany system nawigacyjny, w którym mapa jest tylko jednym z jego elementów. System ten obejmuje również urządzenie radarowe oraz odbiornik systemu radionawigacyjnego. Dzięki temu decydentowi w przejrzysty sposób przedstawiona jest zarówno informacja dotycząca pozycji i trajektorii statku własnego, jak również pozycji innych jednostek oraz ograniczeń nawigacyjnych.

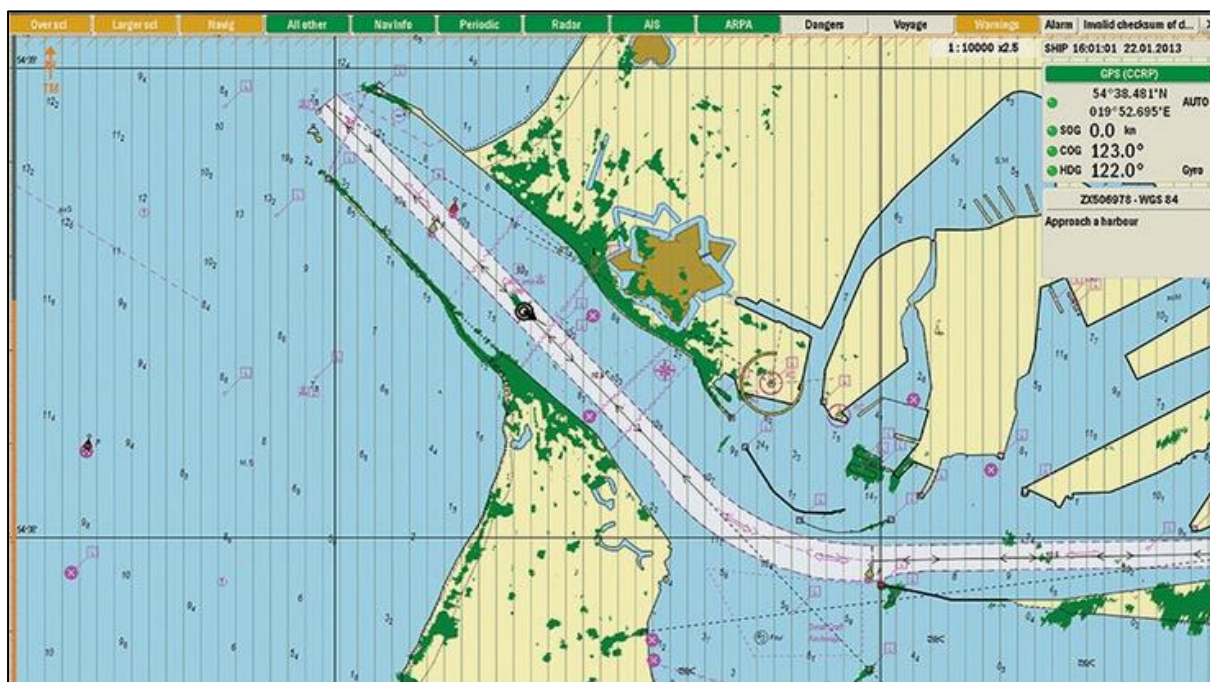


Rysunek 64 - Schemat systemu elektronicznej mapy nawigacyjnej (Urbański 2006).

Na monitorze kontrolnym decydent uzyskuje:

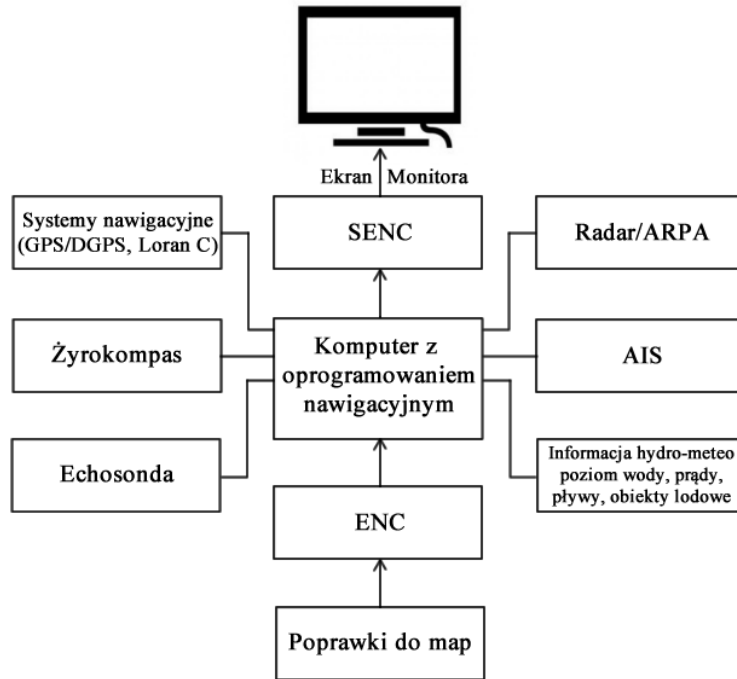
- kolorowy obraz mapy ze zmienną skalą, która mając na celu przejrzystość, przedstawia jedynie podstawowe informacje takie, jak:
 - niektóre izobaty,
 - granice torów wodnych,
 - kanały,
 - niebezpieczne obszary,
 - znaki brzegowe,
 - światła,
 - pławy,
 - widoczną radarem linią brzegową.
- kontur statku własnego z wyświetlonym wektorem kursu i prędkości, umieszczony w aktualnej pozycji statku. Pozycję wyznacza się za pomocą odbiornika systemu radionawigacyjnego bądź przez porównanie obrazu radarowego z modelem rejonu przedstawionym na mapie,
- pełny obraz sytuacji nawigacyjnej przedstawiony na mapie w czasie rzeczywistym.

Elektroniczne mapy pozwalają uwzględnić również wiele innych elementów. Możliwe jest zaplanowanie trajektorii przejścia statku, poprzez wykreślenie zamierzonej trasy. System zapisuje wprowadzoną ręcznie trajektorię i wyświetla ją na ekranie, gdy statek znajdzie się na danym obszarze. System wywołujący pozwala na wyświetlenie niektórych potrzebnych danych np. rodzaju dna morskiego, aktualnej głębokości itp. Obok obrazu mapy na ekranie, na specjalnym wskaźniku alfanumerycznym, można uzyskać szereg dodatkowych informacji dotyczących zarówno własnego statku, jak i innych obiektów.



Rysunek 65 - Przykładowy widok systemu elektronicznych map nawigacyjnych firmy Martek. Na mapie widoczna cieśnina Piławska.

Obecnie wykorzystuje się system map elektronicznych ECDIS (ang. Electronic Chart Display and Information System). System ten podaje hydrograficzną informację, która może być połączona z informacją dostarczaną przez elektroniczne systemy wyznaczania pozycji, radar itd. w celu zapewnienia bezpieczeństwa nawigacji statku. ECDIS składa się z baz danych elektronicznych map nawigacyjnych (ENC – ang. Electronic Navigational Charts Data Bases) oraz wyposażenia służącego do wyświetlania map elektronicznych (ECDIE – ang. Electronic Chart Display Equipment). ENC to dane i środki służące do przechowywania danych zatwierdzone przez oficjalne władze hydrograficzne, które zawierają informacje użyteczne dla nawigacji, takie jak linie brzegowe, przeszkody, latarnie morskie, pławy itp. Z kolei ECDIE to wyposażenie służące do wyświetlania, które przetwarza i pokazuje niezbędną informację zebraną w ENC oraz inne informacje w celu zapewnienia bezpiecznej nawigacji.



Rysunek 66 - Konfiguracja systemu ECDIS. Dane wyświetlane na ekranie monitora zbierane są przez SENC (ang. System Electronic Navigation Charts – System map elektronicznych).

Dane wyświetlane na mapie elektronicznej różnią się w zależności od jej zastosowania. Najważniejszą informacją z perspektywy decydenta jest dokładne pozycjonowanie własnego statku względem innych obiektów widocznych na mapie.

Przetwarzanie wyników pomiarów systemów radionawigacyjnych na współrzędne geograficzne pozycji, z jednoczesnym automatycznym wprowadzaniem poprawek, jest już powszechnie stosowane w wielu typach odbiorników. W strefie brzegowej możliwa jest praca systemu bez korzystania z informacji pochodzącej z odbiornika systemu radio-nawigacyjnego. Pozycjonowanie statku odbywa się wówczas poprzez porównanie odczytu radarowego z modelem obszaru strefy przybrzeżnej, który może być wczytany w pamięć komputera. Odbywa się to automatycznie z dokładnością rzędu kilku metrów.

Zanim elementy mapy zostaną zapisane w pamięci komputera muszą zostać poddane procesowi obróbki cyfrowej, co wiąże się z kolei z problemem rodzaju i zagęszczenia wymaganych danych. Jednym z głównych problemów tradycyjnych map papierowych jest ich coraz większa nieczytelność. Jest to spowodowane wzrostem zagęszczenia elementów treści mapy. Elektroniczne mapy rozwiązują ten problem poprzez wybiórcze wprowadzanie danych lub też filtrowanie przy pomocy interfejsu informacji wyświetlanej na ekranie.

Niewątpliwą zaletą elektronicznych map jest możliwość zmiany jej skali w zależności od preferencji użytkownika. I tak, w miarę jak statek zbliża się do portu lub innego obszaru wymagającego szczególnej uwagi, decydent może pracować na mapie o większej skali, tym samym uzyskując bardziej szczegółowy obraz. Zdolność ta może być zapewniona przez wczytanie w pamięć komputera zbioru odrębnych struktur, gdzie każdej skali mapy odpowiadałaby inna baza danych lub przez zmianę skali w sposób ciągły.

Jako że cyfrowa obróbka map pozwala na dowolną reprezentację symboliczną zebranych danych istnieje problem, czy należy kopiować dokładnie istniejące mapy papierowe, czy też starać się stworzyć nowe symbole. Cyfrowa forma mapy umożliwia przedstawienie jej w sposób dynamiczny, poprzez wprowadzenie np. błyskowych symboli celem zwrócenia uwagi decydenta, co jest niemożliwe na mapach papierowych. Obraz dynamiczny może dotyczyć również charakterystyki widocznych świateł, jak też stanowić rodzaj alarmu, gdy występuje ryzyko kolizji.

Możliwość prezentacji na ekranie zarówno statycznych elementów mapy, jak i ruchomych obiektów, była uważana za podstawowy problem podczas wczesnych dni systemu. Dopasowanie obrazu radarowego do obrazu mapy odbywa się poprzez porównanie poszczególnych odczytanych elementów z elementami modelu strefy brzegowej. Do bieżącego wyznaczania, pozycji statku wykorzystuje się metody korelacji i podobieństwa elementów obrazów. W wielu mapach elektronicznych obraz został przedstawiony w ruchu rzeczywistym. Statek obserwującego mapę decydenta porusza się na tle nieruchomego obrazu mapy i z chwilą, gdy osiągnie jej krawędź, mapa automatycznie przesuwa się na następny jej obszar. Istnieją również systemy, w których statek obserwatora znajduje się stale na środku obrazu.

Oprogramowanie map elektronicznych ECDIS i ECS posługuje się mapami o różnych formatach. Najważniejsze z nich to rastrowe (BSB) i wektorowe ENC (S-57), CM93, TX-97. Większość systemów umożliwia wykorzystanie co najmniej dwóch formatów z wyżej wymienionych (Pastusiak, 2009).

Standardowo mapy dzieli się zgodnie z rodzajem żeglugi, pierwsza cyfra numeru mapy określa jej zastosowanie (skalę):

- Overview – #1 – skala 1:1 500 001 lub mniejsza,
- General – #2 – skala 1:600 001 – 1:1 500 000,
- Coastal – #3 – skala 1:150 001 – 1:600 000,
- Approach – #4 – skala 1:50 001 – 1:150 000,
- Harbour – #5 – skala 1:50 000 lub większa.

9.4 System ARPA

ARPA jest to klasa urządzeń, które przetwarzają dane radarowe i prezentują jej wyniki w zadanej formie, bez konieczności obserwowania obiektów przez obsługę radaru (Jereczek 2014). Urządzenie takie jest wymagane dla wszystkich statków większych niż 10000 RT brutto zbudowanych po 01.08.1984. Rozwój systemu rozpoczął się po katastrofie Włoskiego statku Andrea Doria oraz Szwedzkiego Stockholm w lipcu 1956, która zakończyła się zatopieniem tego pierwszego. Przyczyną była gęsta mgła.

Urządzenia typu ARPA były pierwotnie budowane jako osobne jednostki, obecnie jest to moduł wbudowany w radar.

Urządzenia ARPA muszą wykonywać następujące zadania:

- śledzenie – obserwacja kolejnych zmian pozycji obiektów celem określenia parametrów ich ruchu,
- przewidywanie miejsc, w których śledzone obiekty będą poruszać się w przyszłości,
- korelacja – określanie zaktualizowanego bieżącego położenia na podstawie przewidywanych i aktualnie zmierzonych położzeń echa,
- możliwość wyboru śledzonego echa,
- detekcja – rozpoznanie obecności obiektu,
- akwizycja – wybór ech wymagających obserwacji dokonywany ręcznie lub automatycznie,

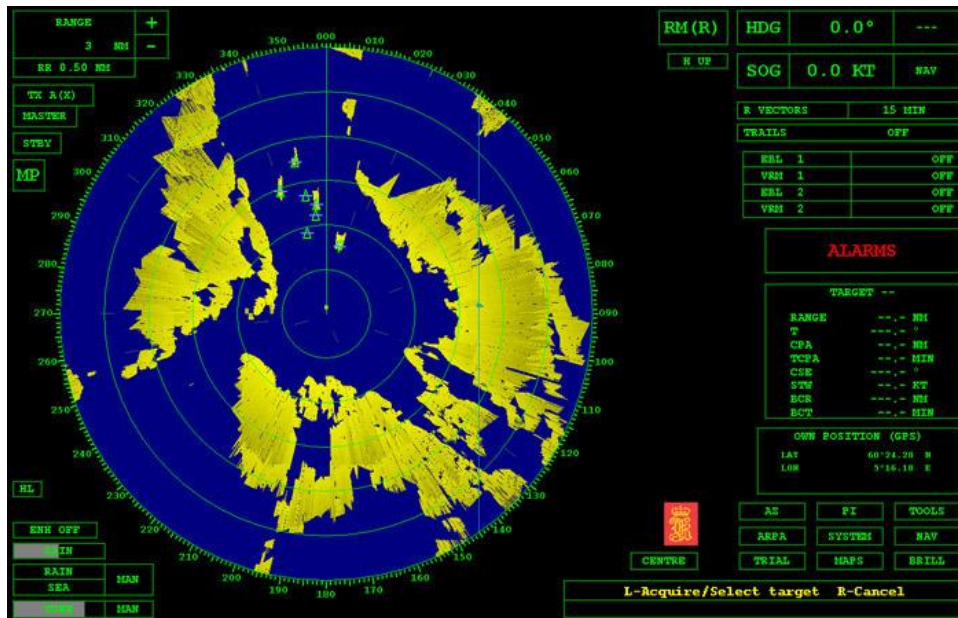
Dodatkowo system musi po czasie 1 minuty od rozpoczęcia obserwacji przedstawić tendencję ruchu obiektu, natomiast w czasie nie dłuższym jak 3 minuty podać dane o obiekcie z dokładnością wynoszącą 95%. System ARPA pozwala na wyznaczenie szeregu alarmów oraz na wyodrębnianie różnorodnych informacji o śledzonych obiektach takich jak namiar, odległość czy prędkość poruszania się. Możliwe jest symulowanie wpływu manewrów własnego statku na obiekty w zasięgu radaru przez przerywanie obserwacji. System może również sygnalizować awarie takie jak np. brak sygnału z GPS (WWW – BSL).

Przykład prezentacji danych na pulpicie systemu ARPA przedstawiono na rysunku 67. Na rysunku 68 pokazano przykładowe wolnostojące stacje systemu ARPA.

Oprócz opisanych wyżej możliwości, można wyróżnić kilka dodatkowych funkcji systemu ARPA:

- automatyczna stabilizacja obrazu względem dna: System pozwala wybrać obiekt stały, który zostaje poddany aktywizacji i zostaje określony jako cel (ang. fixed target). Od tamtej pory rozpocznie się pomiar parametru znosu z automatyczną stabilizacją obrazu radarowego względem dna,
- linie nawigacyjne i mapy – ARPA ma możliwość generowania map pomocniczych np. w obszarach o ograniczonym obszarze ruchu, które może zapisywać w systemie lub na pamięciach zewnętrznych. Przy zmianie zakresu mapa proporcjonalnie zmienia swoje wymiary. Mapy wykorzystywane są w zobrazowaniu ruchu rzeczywistego,
- PPC – system jest w stanie wykryć oraz ostrzec operatora o możliwej kolizji, która może się wydarzyć w wypadku zachowania bieżącego kursu i prędkości,
- obszary zagrożenia kolizyjnego – Na wskaźniku radiowym wyświetlane są obszary nadmiernego zbliżenia,

- sektor niebezpieczny – System może zaalarmować operatora w chwili przekroczenia obszaru niebezpiecznego,
- sztuczna poświata – Funkcja ta prezentuje drogę widocznego na ekranie obiektu. Poświata może być prezentowana zarówno w czasie rzeczywistym, jak i względnym. W pierwszym przypadku obserwator widzi jak poruszał się obiekt a w drugim jego drogę względną. Po zmianie zakresu poświata budowana jest od nowa.



Rysunek 67 - Przykład prezentacji danych na pulpicie systemu ARPA.

W systemach ARPA mogą pojawiać się błędy, które można podzielić na trzy klasy:

- błędy wewnątrz instalacji radiowej:
 - migotanie echa,
 - błąd namiaru (kołysanie statku, położenie anteny),
 - błąd pomiaru odległości (ok. 1% zakresu),
 - błąd żyroskopu.
- błędy wyświetlania danych:
 - zmiana śledzonego obiektu,
 - gubienie ech (np. gdy dwa echa znajdują się na tym samym obszarze),
 - system musi posiadać możliwość wygładzania otrzymanej trasy (smoothing),
 - wpływ wprowadzenia nieprawidłowej informacji o kursie i prędkości statku własnego na wektory rzeczywiste obserwowanych obiektów.
- błędy interpretacji wyświetlanych danych, czyli błędy decydenta – pomyłka w interpretacji wektorów, zła interpretacja historii ruchu obiektów, itp.

W systemie należy wyróżnić następujące ograniczenia:

- istnieje brak pewności wykrycia wszystkich obiektów (zależy od panujących warunków hydrometeorologicznych, rodzaju obiektów, itd.),
- podczas manewrów statku własnego i obiektu dokładność wyznaczanych danych ulega obniżeniu, a nawet zafałszowaniu,

- nie ma możliwości aktywizacji obiektu znajdującego się zbyt blisko statku własnego. Nawet jeżeli tak się stanie, będzie już za późno by czekać na obliczenia systemu (ok. 3 minut),
- gubienie ech.



Rysunek 68 - Przykładowe wolnostojące stacje systemu ARPA

9.5 System AIS

9.5.1 Podstawowe parametry systemu AIS

Jednym z głównych założeń hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść jest wykorzystanie danych wejściowych dostępnych w istniejących systemach śledzenia jednostek morskich. Dlatego też dane te będą pochodzić z systemu AIS. Głównym jego zadaniem jest automatyczne przesyłanie w relacjach statek-statek i statek-brzeg oraz wizualizacja następujących parametrów (Wawruch 2002):

- a) identyfikacyjnych: dotyczących trasy przepływu, stopnia uprzywilejowania wynikającego z prawideł COLREG, liczby ludzi na statku i przewożonych ładunkach niebezpiecznych oraz aktualną pozycję geograficzną i wektor ruchu analizowanej jednostki,
- b) znaczących dla bezpieczeństwa żeglugi, np. lokalnych ostrzeżeń nawigacyjnych.

Przed powstaniem systemu AIS, do identyfikacji statków wykorzystywano rozwijane w Szwecji w latach osiemdziesiątych tak zwane transpondery „4S” służące do automatycznej łączności w relacji statek-statek i statek- brzeg (Wawruch 2002). Zgodnie z postanowieniami tekstu V Międzynarodowej konwencji o bezpieczeństwie życia na morzu SOLAS z 1974 roku, system AIS to urządzenie radiowe, które pozwala na:

- automatyczną transmisję do stacji brzegowych, innych jednostek pływających i statków powietrznych: danych identyfikujących statek i jego typ, oraz określających jego aktualną pozycję, kurs, prędkość, status nawigacyjny i przewożony ładunek niebezpieczny, a także krótką informację dotyczącą bezpieczeństwa,
- automatyczny odbiór takiej samej informacji nadawanej przez tak samo wyposażone statki,
- automatyczne monitorowanie pozycji i obserwacja statków,
- automatyczną wymianę danych z urządzeniami brzegowymi.

Omawiane urządzenie instaluje się na:

- statkach,
- brzegu jako tak zwane urządzenie bazowe i przekaźnikowe,
- w strukturach systemów VTS,
- na jednostkach lotniczych SAR (ang. Search and Rescue – jednostki poszukiwania i ratunku),
- na oznakowaniach nawigacyjnych.

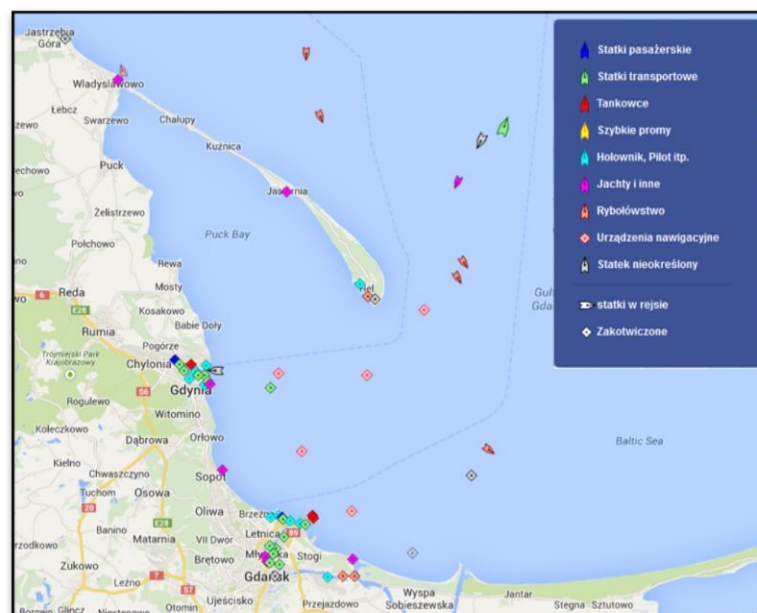
Aktualnie rozwija się dwie klasy statkowych AIS:

- a) klasę A, przeznaczoną dla statków morskich, na których urządzenie to jest wymagane zgodnie z postanowienia prawidła 19.2.4.1-3 „Wymagania dotyczące posiadania przez statki systemów nawigacyjnych oraz wyposażenia. Wyposażenia statkowe i systemy nawigacyjne” rozdziału V Międzynarodowej konwencji o bezpieczeństwie życia na morzu SOLAS z 1974 znowelizowanej w roku 2000.
- b) klasę B, przeznaczoną dla jednostek, na których urządzenie może być zainstalowane dobrowolnie zgodnie ze wspomnianą wyżej konwencją.

Zgodnie z wymaganiami prawidła 19 rozdziału V konwencji SOLAS, AIS klasy A należy instalować na:

- wszystkich statkach pasażerskich niezależnie od ich wielkości,
- wszystkich innych statkach o pojemności brutto 300 i większej zatrudnionych w podróżach międzynarodowych,
- statkach towarowych o pojemności brutto 500 i większej nie zatrudnionych w podróżach międzynarodowych,
- statkach zbudowanych 1 lipca 2002 roku lub po tej dacie – w momencie zbudowania,
- statkach używanych w podróżach międzynarodowych zbudowanych przed 1 lipca 2002 roku:
 - pasażerskich – nie później niż 1 lipca 2003 roku,
 - zbiornikowcach – nie później niż do czasu pierwszej inspekcji bezpieczeństwa wyposażenia przypadającej w dniu 1 lipca 2003 roku lub po tej dacie,
 - innych niż pasażerskich i zbiornikowcach,
 - statkach niezatrudnionych w podróżach międzynarodowych.

Przykładowy zbiór danych zebranych przez system AIS w rejonie Zatoki Gdańskiej przedstawiono na rysunku 69.



Rysunek 69 – Zbiór danych AIS dla zatoki Gdańskiej w dniu 04.09.2014, godzina 08:09.

9.5.2 Wymagania techniczne

Brzegowe i statkowe urządzenia AIS pracują z wykorzystaniem techniki zwiłokrotnionego czasowego przydziału kanałów TDMA (ang. Time Division Multiple Access) w pasmie UKF na kanałach dupleksowych lub simpleksowych o szerokości 25 kHz lub 12,5 kHz (Wawruch 2012). By zapewnić jednoczesną pracę w relacji statek – statek i statek – brzeg urządzenia AIS powinny pracować jednocześnie na dwóch częstotliwościach: AIS 1 (161,975 MHz – kanał 87B) i AIS 2 (162,025 MHz – kanał 88B) (Światowa Konferencja Radiokomunikacyjna, 2012). Jeżeli te częstotliwości są zajęte w danym regionie, urządzenie powinno automatycznie przełączyć się na inne, wyznaczone kanały pasma UKF. Takiego przełączenia mogą dokonać między innymi

urządzenia bazowe AIS lub osoba obsługująca dane urządzenie na statku. Celem zapewnienia automatycznego, zdalnego zarządzania częstotliwościami pracy, AIS wyposażone są w odbiornik pasma UKF pracujący w kanale 70 z wykorzystaniem techniki selektywnego wywołania. Taki odbiornik pozwala na wykorzystanie omawianego urządzenia w systemach zgłaszania statków funkcjonujących z wykorzystaniem technik SDC na przykład w Kanałowym Nawigacyjnym Systemie Informacyjnym w Cieśninie Kaletańskiej i w systemach VTS w Valdez na Alasce. Używaną metodą modulacji jest modulacja częstotliwości FM/GMSK.

Technikę TDMA stosuje się, by dostarczyć algorytmowi przydzielającego danym urządzeniom tymczasowe ramki nadawcze, na które podzielone jest czas nadawania. Pojedyncza ramka trwa jedną minutę. Te z kolei dzielą się na 2250 ramek elementarnych o równej długości. Pojedyncza ramka elementarna trwa 26,67 ms i umożliwia przesłanie 256 bitów danych. Identyfikowana jest przydzielonym jej numerem od 0 do 2249. Ramki mogą być w jednym z czterech stanów:

- wolny – ramka jest dostępna dla wszystkich użytkowników,
- przydziału własnego – ramka jest przydzielona do własnych transmisji i może zostać użyta,
- przydziału zewnętrznego – ramka jest przydzielona innemu użytkownikowi do transmisji i nie może być używana,
- dostępny – ramka jest zarezerwowana do transmisji do dalekiego urządzenia.

Nadawanie można rozpocząć na początku ramki elementarnej przydziału własnego dokładnie zsynchronizowanej czasowo. Podstawową metodą przypisywania ramek jest technika zwielokrotnionego czasowego przydziału kanałów na żądanie (SOTDMA – ang. Self-Organized Time Division Multiple Access). Przy jej zastosowaniu każde urządzenie ustala swój własny zakres transmisji na podstawie dostępnych dla niego informacji o dotychczasowych i planowanych transmisjach innych urządzeń AIS. Synchronizacja między nimi ma charakter ciągły, by uniknąć wzajemnego nakładania się ramek elementarnych. Podstawowym źródłem informacji o czasie jest najczęściej moduł GPS, będący składowym każdego AIS klasy A. Dzięki niemu możliwa jest synchronizacja bezpośrednia.

Kwestia synchronizacji jest bardzo istotna. Wszystkie urządzenia AIS muszą mieć ten sam czas odniesienia, gdyż służy on do numeracji ramek. W przypadku rozsynchronizowania się urządzeń może nastąpić odmienna numeracja ramek, co mogłoby powodować problemy w transmisji poprzez, na przykład, nakładanie się ramek. AIS odrzuci wszelkie zbyt zdegradowane sygnały, podobnie jak zostaną zignorowane sygnały od jednostek znajdującej się dalej niż 100 mil morskich od urządzenia.

Dodatkowo wyróżnia się następujące metody transmisji:

- ITDMA – rozszerzony system TDMA (ang. Incremental Time Division Multiple Access),
- RATDMA – dostęp do TDMA (Random Access Time Division Multiple Access),
- FATDMA – częstotliwościowy dostęp wielokrotny (Fixed Access Time Division Multiple Access).

Zależnie od przyjętej metody dostępu do transmisji, wyróżnia się następujące sposoby pracy AIS (Adamczyk–Kotarska 2006):

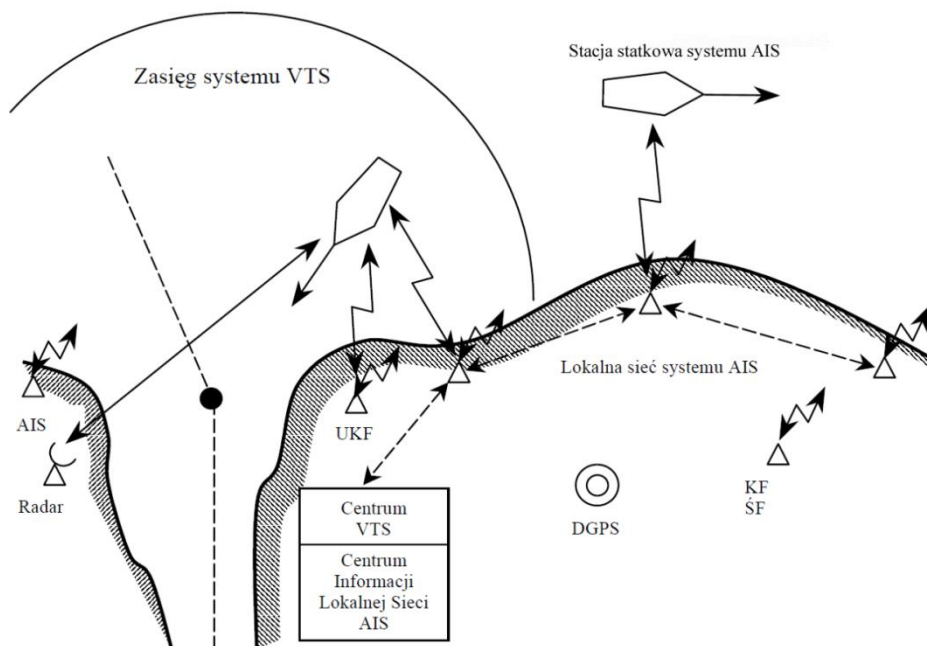
- autonomiczny (ciągły), który przesyła dane w następujących odstępach czasu:
 - statyczne – co 6 minut i na żądanie,
 - dynamiczne – od co 2 do co 10 sekund w zależności od zmiany kursu i prędkości statku,

- o dotyczące podróży – co 6 minut, na żądanie i w przypadku zmiany któregokolwiek z parametrów,
- o krótką informację dotyczącą bezpieczeństwa – po wprowadzeniu i na żądanie,
- wyznaczone – częstotliwości i momenty czasowe transmisji meldunków pozycyjnych są określane automatycznie przez upoważnione do tego urządzenia bazowe działające samodzielnie lub za pośrednictwem tak zwanego urządzenia przekaźnikowego,
- odzewowy – AIS na statku transmituje dane po odebraniu sygnału zapytania nadanego przez inną jednostkę pływającą lub statek powietrzny, jak również przez urządzenie brzegowe.

Podstawowym sposobem działania systemu AIS jest tryb autonomiczny z kanałem simpleksowym UKF o szerokości 25 kHz. W takim ustawieniu dane wysyłane są z prędkością 9600 bitów/s co oznacza około 2000 raportów na minutę. Kanał simpleksowy o szerokości 12,5 kHz wysyła połowę danych szerszego kanału. Jednoczesne zastosowanie dwóch kanałów łączności zwiększa liczbę raportów na minutę odpowiednio do 4000 i 2000.

Na rysunku 70 przedstawiono podstawowe części składowe systemu AIS:

- stacje nadbrzeżne AIS,
- stacje statkowe AIS,
- centrum Informacji Lokalnej Sieci AIS (C. AIS),
- stacje systemów wspomagających AIS (stacje GNSS (ang. Global Navigational Satellite System - Globalnych Systemów Nawigacji Satelitarnej) (WWW – IGK) Światowy Satelitalny System Nawigacyjny oraz GMDSS).



Rysunek 70 - Główne elementy lokalnej sieci systemu AIS (Kopacz 2007).

9.5.3 Wymagania dotyczące systemu AIS Klasy A

Statkowy AIS klasy A składa się z (Wawruch 2012):

- jednego nadajnika pasma UKF,
- dwóch odbiorników pasma UKF zdolnych do odbioru informacji przesyłanych z wykorzystaniem techniki TDMA,
- odbiornika pracującego z wykorzystaniem techniki cyfrowego selektywnego wywołania na wybranym kanale,
- odbiornika systemu GNSS do odbioru sygnałów czasu oraz mogącego służyć jako rezerwowe źródło informacji o pozycji, kącie drogi nad dnem i prędkości nad dnem statku,
- układów podłączeniowych do: Statkowego systemu GNSS, żyrokompasu, radaru, ARPA, ECDIS, miernika prędkości kątovej zwrotu, urządzeń łączności dalekiego zasięgu, przenośnego terminalu pilotowego i monitora zewnętrznego AIS,
- monitora i klawiatury umożliwiającej manualne wprowadzanie danych np. na temat statusu nawigacyjnego jednostki lub dotyczących podróży i prezentację informacji,
- procesora sterującego pracą urządzenia, między innymi procesem doboru ramek, formowania wiadomości i przepływu danych,
- układu testującego integralność pracy urządzenia w aspekcie niezawodności BIIT (ang. Build in Integrity Test – wbudowany test integralności),
- zasilacza,
- anteny.

Klawiatura i monitor znajdujące się na wyposażeniu AIS powinny umożliwiać:

- konfigurację AIS i jego obsługę,
- ręczne wprowadzanie wszystkich jednostek,
- zobrazowanie co najmniej nazw wykrytych AIS statkowych oraz ich namiarów,
- zobrazowanie alarmów i ich potwierdzenie,
- ręczne wprowadzanie informacji dotyczących bezpieczeństwa,
- załączanie automatycznego lub ręcznego trybu pracy dalekiego zasięgu,
- wyświetlanie odebranych i wymagających potwierdzenia zapytań w trybie pracy dalekiego zasięgu,
- manualne odpowiedzi na zapytanie otrzymane w trybie pracy dalekiego zasięgu,
- zmianę częstotliwości pracy AIS i mocy jego nadajnika,
- zobrazowanie odczytów odbiornika wewnętrznego GNSS w przypadku jego wykorzystania jako źródła informacji o pozycji,
- BIIT powinien spełniać następujące wymagania:
 - działanie w sposób ciągły lub załączać się w zdefiniowanych odstępach czasowych
 - kontrolowanie dostępności danych przesyłanych do AIS z czujników zewnętrznych (GNSS i żyrokompas)
 - sprawdzanie poprawności dokonywanych transmisji
 - generowanie alarmów po wykryciu awarii urządzenia lub niepoprawnie wykonanej funkcji oraz wyświetlić na wskaźniku przyczynę zadziałania.
 - wszelkie alarmy powinny być powtarzane co 30 minut. Możliwe alarmy zostały przedstawione w tabelach poniżej.

Statkowy AIS klasy A, który pracuje na dwóch częstotliwościach, jest wyposażony w jeden nadajnik i dwa pasma UKF: dwa wykorzystujące technikę TDMA i jeden DSC. Może zatem odbierać jednocześnie dwie wiadomości wysyłane przez dwa różne urządzenia. W wypadku posiadania wyłączanie jednego nadajnika sam może wysyłać wiadomości tylko naprzemiennie, po kolei na każdej z częstotliwości. W takim wypadku, przykładowo, urządzenie AIS zainstalowane na statku płynącym z prędkością większą niż 23 węzłów powinno wysyłać w trakcie manewru zmiany kursu raport o pozycji co 2 sekundy. Jeżeli czyni to naprzemiennie na dwóch częstotliwościach, to na danej częstotliwości raport będzie transmitowany co 4, a nie co 2 sekundy.

Uaktualnione postanowienia konferencji SOLAS (IMO 2002) nakładają obowiązek posiadania włączonego systemu AIS w sposób ciągły pod groźbą konsekwencji prawnych. System może zostać wyłączony jedynie w sytuacji zagrożenia dla statku.

9.5.4 Informacje przysyłane przez statkowy system AIS klasy A

AIS klasy A przesyła następujące dane (Wawruch 2012):

a) Statyczne:

- numery MMSI (ang. Maritime Mobile Service Identity - morski numer identyfikacyjny), IMO oraz nazwa i sygnał wywoławczy statku,
- długość i szerokość statku,
- wyporność,
- typ statku określony kodem dwucyfrowym według tabeli 6,
- pozycję anteny statkowego odbiornika radionawigacyjnego podłączone do AIS w stosunku do środka symetrii statku,
- wysokość statku określoną jako pionowa odległość od stępki od topu masztu.

Dane te wprowadzane są w trakcie instalacji urządzenia i aktualizowane w wypadku zmiany nazwy i sygnału wywoławczego statku, jego przebudowie w trakcie której zmieniają się którekolwiek z wymienionych danych lub jego przeznaczenie, jak również w wypadku zmiany odbiornika radionawigacyjnego podłączonego do AIS i miejsca instalacji jego anteny. Są one chronione przed nieautoryzowanym dostępem. Na statkach z kilkoma odbiornikami systemów radionawigacyjnych podłączonymi do AIS oraz na promach mogących przemieszczać się w dwóch kierunkach dopuszczalna jest manualna zmiana anteny.

Tabela 6 – Identyfikatory typów statków

Identyfikatory typów statków			
Jednostki specjalne			
Nr identyfikatora		Typ jednostki	
50		Pilotówka	
51		Jednostka SAR	
52		Holownik	
53		Portowa z jednostką pomocniczą	
54		Statek z wyposażeniem do zwalczania zanieczyszczeń	
55		Statek służby państwowej	
56		Numer zapasowy - dla jednostek lokalnych	
57		Numer zapasowy - dla jednostek lokalnych	
28		Statek szpitalny	
59		Statek spełniający zalecenia Rezolucji nr 18	
Inne statki			
Cyfra numeru identyfikatora			
Pierwsza	Druga	Pierwsza	Druga
0 - niestosowany	0 - wszystkie statki danego typu	-	0 - rybacki

1 - zarezerwowany do przyszłego użytku	1 - przewożące ładunki niebezpieczne, ładunki szkodliwe lub materiały zanieczyszczające kategorii A	-	1 - holujący
2 - ekranoplan (WIG)	2 - przewożące ładunki niebezpieczne, ładunki szkodliwe lub materiały zanieczyszczające kategorii B	-	2 - holujący, gdy długość zespołu > 200 m lub szerokość >25m
3 - patrz kolumna 3	3 - przewożące ładunki niebezpieczne, ładunki szkodliwe lub materiały zanieczyszczające kategorii C	3 - statek	3 - zajęty pogłębianiem lub pracami podwodnymi
4 - jednostka szybka (HSC)	4 - przewożące ładunki niebezpieczne, ładunki szkodliwe lub materiały zanieczyszczające kategorii D	-	4 - zajęty pracami nurkowymi
5 - patrz część pierwsza li	5 - zarezerwowany do przyszłego użytku	-	5 - zajęty operacjami militarnymi
6 - statek pasażerski	6 - zarezerwowany do przyszłego użytku	-	6 - żaglowy
7 - statek towarowy	7 - zarezerwowany do przyszłego użytku	-	7 - jednostka reakcyjna
8 - chemikaliowiec, gazowiec, zbiornikowiec	8 - zarezerwowany do przyszłego użytku	-	8 - zarezerwowany do przyszłego użytku
9 - statek innego typu	9 - brak dodatkowych informacji	-	9 - zarezerwowany do przyszłego użytku

b) dynamiczne:

- pozycję geograficzną otrzymaną ze statkowego odbiornika radionawigacyjnego podłączonego do AIS wraz ze wskazaniem klasy jej dokładności,
- czas uniwersalny (UTC) z odbiornika GNSS stanowiącego część składową AIS,
- obliczone przez statkowy odbiornik radionawigacyjny podłączony do AIS, aktualne wartości kąta drogi nad dnem i prędkości nad dnem (ta informacja może być niedostępna),
- kurs z żyrokompasu,
- masę netto,
- status nawigacyjny statku wprowadzony ręcznie przez obsługę zgodnie z postanowieniami międzynarodowych przepisów o zapobieganiu zderzeniom na morzu. Możliwe statusy:
 - w drodze o napędzie mechanicznym,
 - w drodze pod żaglami,

- zacumowany,
- zakotwiczony,
- na mieliźnie,
- statek nie odpowiadający za swoje ruchy,
- o ograniczonej zdolności manewrowej,
- o ograniczonym zanurzeniu,
- zajęty połowem.

By dopełnić swoich obowiązków członek załogi powinien wprowadzić i sprawdzić aktualny status nawigacyjny oraz upewnić się, że pozycja geograficzna jest podawana w układzie odniesienia WGS-84. Pozostałe dane pozyskiwane są automatycznie.

c) dotyczące podróży:

- aktualną wartość zanurzenia maksymalnego statku,
- żądane przez administrację morską państwa nadbrzeżnego, system zgłaszania statków oraz lub władze portowe, dane na temat przewożonych ładunkach niebezpiecznych, szkodliwych lub zanieczyszczających środowisko. Nie jest wymagane przy tym podanie ilości ładunku,
- port przeznaczenia i przewidywany czas przybycia statku (ETA),
- planowaną trasę przepływu z pozycjami geograficznymi kolejnych punktów zwrotu oraz opis słowny trasy,
- ilość osób na statku wraz z załogą.

Informacje z ostatnich trzech podpunktów nie są obowiązkowe i mogą być przesyłane jeżeli wymagają tego upoważnione organy lub jeżeli kapitan wyda zgodę na udostępnienie takiej informacji.

d) nie dłuższą jak 126 znaków, informację dotyczącą bezpieczeństwa (ważne ostrzeżenia nawigacyjne) przesyłane do określonego statku, grupy statków lub do wszystkich jednostek w danym rejonie.

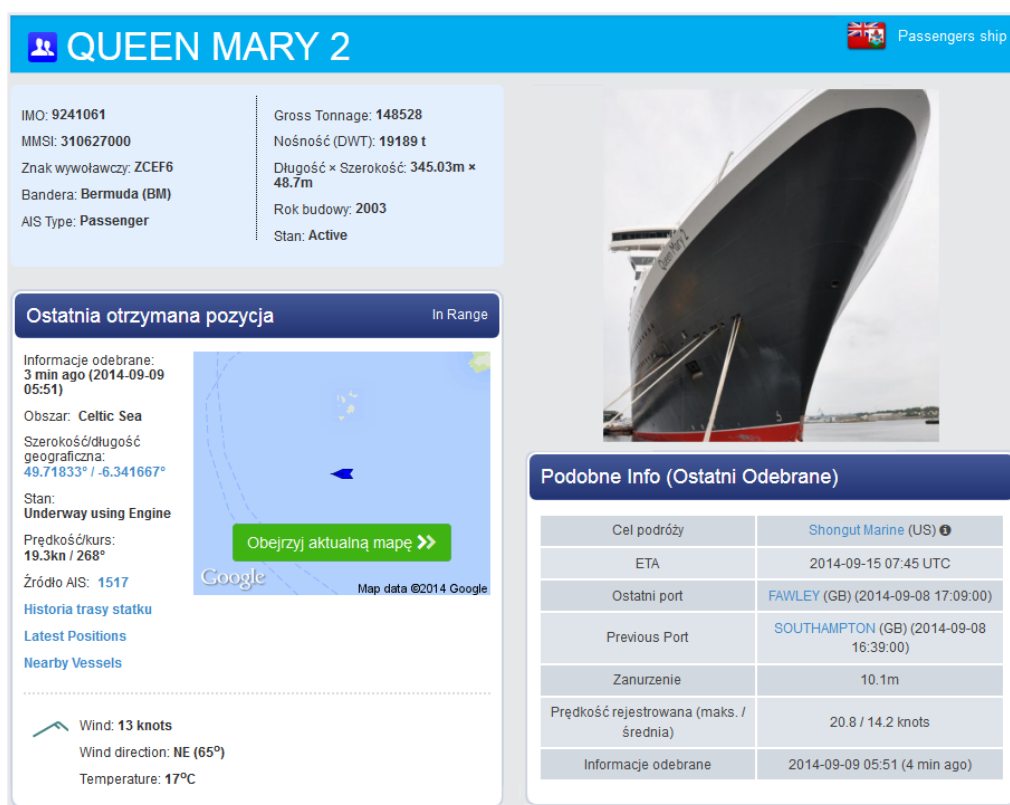
AIS klasy A pracujący sposobem ciągłym (Autonomicznym) przesyła automatycznie wymienione dane w następujących interwałach czasowych:

- statyczne: Co 6 minut i na żądanie (odpowiedź wysyłana jest automatycznie),
- dynamiczne: W odstępach czasowych pokazanych w tabeli 7,
- dotyczące podróży: Co 6 minut, na żądanie lub w przypadku zmiany którejkolwiek z danych,
- krótką informację dotyczącą bezpieczeństwa – po wprowadzeniu i na żądanie.

Na rysunku 71 przedstawiony przykładowy zestaw powyższych danych systemu AIS dla statku pasażerskiego Queen Mary II.

Tabela 7 – Interwały transmisji danych dynamicznych AIS klasy A.

Statek	Częstotliwość transmisji
Zacumowany lub na kotwicy i przemieszczający się z prędkością nie większą niż 3 węzły	Co 3 minuty
Zacumowany lub na kotwicy i przemieszczający się z prędkością większą niż 3 węzły	Co 10 sekund
Płynący stałym kursem z prędkością do 14 węzłów	Co 10 sekund
Płynący prędkością do 14 węzłów i zmieniający kurs ³	Co 10 sekund
Płynący ze stałą prędkością 14-23 węzły	Co 3,4 sekundy
Płynący prędkością do 14 - 23 węzły i zmieniający kurs	co 6 sekund
Płynący ze stałym kursem z prędkością większą niż 23 węzły	co 2 sekundy
Płynący z prędkością większą jak 23 węzły i zmieniający kurs	co 2 sekundy



Rysunek 71 – Publicznie dostępny zestaw danych z systemu AIS dla statku pasażerskiego Queen Mary II (WWW – AIS).

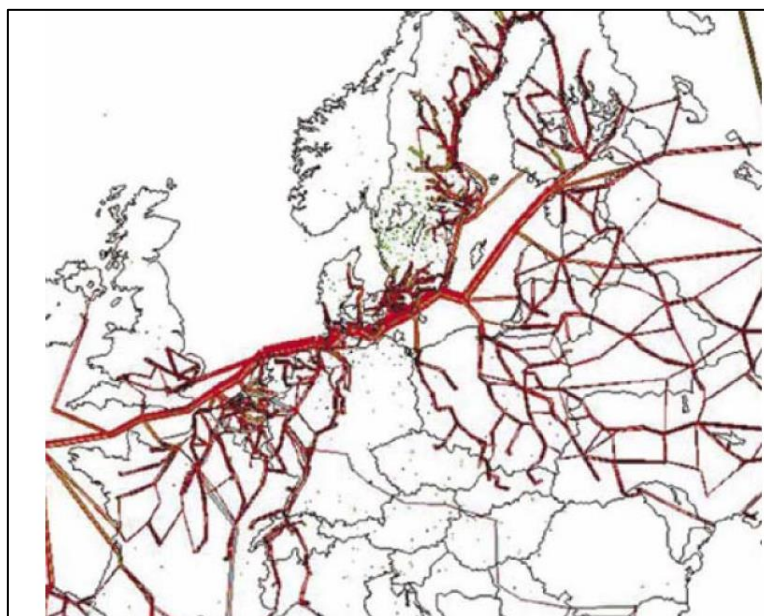
³ Zmiana kursu jest określana na podstawie porównania wartości kursu: aktualnej i średniej w czasie ostatnich 30 sekund. Statek będzie zmieniał kurs jest obliczona różnica przekracza 5°. Status ten powinien być przyznany do momentu gdy różnica między wartością kursu aktualną i średnią nie będzie mniejsza od 5° ale nie dłuższym jak 20 sekund.

9.5.5 Analiza ruchu statków z wykorzystaniem danych transmitowanych przez system AIS

Dane, które pozyskuje się ze stacji brzegowych AIS pozwalają na:

- analizę ścieżek przejść ruchu statków wyposażonych w urządzenia AIS, na przykład na Morzu Bałtyckim,
- poznanie statystyk natężenia ruchu w danych obszarze ,
- prowadzenie badań statystycznych w zakresie rodzajów, typów i wielkości statków przepływających przez wyznaczone punkty kontrolne, a także przewożonych przez nie ładunków (Stupak 2007).

Analizując dane z systemu AIS możliwe jest oszacowanie ryzyka kolizji i jej możliwych skutków dla środowiska naturalnego w danych rejonie poprzez przeprowadzenie tak zwanej formalnej oceny bezpieczeństwa. Na rysunku 72 zaprezentowano trasy przepływów statków wyposażonych w AIS i poruszających się obszarze akwenu morza Bałtyckiego.



Rysunek 72 – Ruch w rejonie morza Bałtyckiego (analizowany pod kątem masy przewożonych towarów) w roku 2005 (Master 2006).

W tabelach 8 i 9 przedstawiono wyniki analizy statystycznej danych zarejestrowanych przez stacje brzegowe AIS. W tabeli 8 widnieją porty docelowe statków wyposażonych w transponder AIS i przepływających w kierunku wschodnim przez akwen położony na północ i na południe od wysp Bornholm. Wynika z niej, że tylko 2.2% ogółu statków wyposażonych w AIS i przepływających przez North Bornholmgat udaje się do portów zatoki Gdańskiej. Większość obserwowanych jednostek wybiera tak zwaną trasę południową pomiędzy Wyspą Bornholm oraz wybrzeżem polskim. W tabeli 9 przedstawiono natomiast typy statków przepływających do portów w Gdańsku i w Gdyni

w okresie od 2003 do 2005 roku. Analiza pokazuje, że zdecydowana większość statków płynących do portów Zatoki Gdańskiej wybiera trasę poniżej wyspy Bornholm, gdzie zlokalizowany jest rezerwat Ławicy Słupskiej. Rejestracje danych AIS pozwalają poznać typy statków i ładunków przewożonych na wybranych trasach jak również bieżące natężenie ruchu. Ponadto możliwe jest wykrywanie zagrożeń kolizji statków płynących poza zasięgiem brzegowych systemów radarowych.

Tabela 8 – Podział statków na północ i południe od Wyspy Bornholm w okresie 01.09.2005 – 31.11.2005

Port docelowy	Statki przepływające na:	
	północ od wyspy	południe od wyspy
Polskie porty	2.20%	39%
Kaliningrad	1.20%	19%
Kłajpeda, Liepaja	4.40%	20%
Pozostałe	92.20%	22%

Tabela 9 – Typy statków odwiedzających polskie porty Zatoki Gdańskiej w okresie 01.05.2003 – 30.04.2005

Typ statku	Liczba	Procent
Chemikaliowce	242	2%
Drobnicowce i chłodniowce	2298	17%
Gazowce	349	2%
Kontenerowce	1634	12%
Masowce	2592	19%
Nie Konwencyjne (marynarka wojenna, rybackie, itp.)	1182	8%
Pasażerskie	458	3%
Promy	1636	12%
Samochodowe	131	1%
Statki Ro-Ro	916	6%
Zbiornikowce	1339	10%
Typ Nieznany	1184	8%
Razem	13663	100%

9.5.6 Jakość informacji pozyskiwanych z systemu AIS

Każdy system wykorzystujący dane dostępne w systemie AIS musi otrzymywać informacje, które są precyzyjne i prawdziwe. Niestety, jak pokazują dane zebrane w tabelach 10 i 11, badanie zdolności AIS zarówno dla danych statycznych, jak i dynamicznych w rejonie Zatoki Gdańskiej (Felski 2010) wykazało liczne błędy. Poziom nieprawidłowości tych danych może mieć wpływ na zdolności ścieżek wyznaczanych z wykorzystaniem tych danych. Zakłada się przy tym, że wartości te reprezentują średnią dla całego systemu.

Tabela 10 - Wyniki badania kompletności oraz zdolności informacji dynamicznych systemu AIS (Felski 2010) na próbie 266 statków w basenie Zatoki Gdańskiej.

Rodzaj informacji	Niezdadność	Niekompletność
Status jednostki	3,76% (10 statków)	6,13% (43371 wierszy)
Szerokość geograficzna	0%	0%
Długość geograficzna	0%	0%
Prędkość nad dnem	9,02% (24 statki)	0,47% (3341 wierszy)
Kąt drogi nad dnem	9,77% (26 statków)	0,47% (3344 wierszy)
Kurs rzeczywisty	22,93% (61 statków)	16,54% (117025 wierszy)
Prędkość zwrotu	25,94% (69 statków)	22,20% (157105 wierszy)

Tabela 11 - Wyniki badania kompletności oraz zdolności informacji statycznych systemu AIS (Felski 2010) na próbie 251 statków w basenie Zatoki Gdańskiej.

Rodzaj informacji	Niekompletność	Uwagi
Nazwa	0,31%	W 216 wierszach stwierdzono brak nazwy, jednak dotyczyło to tylko jednego statku
Numer wg IMO	5,27%	Brak tej informacji stwierdzono w 3630 wierszach, dotyczy to 13 statków (5,17% ogółu statków)
Sygnal zawezwawczy	2,41%	1661 wierszy, źródłem były 2 statki (0,8% ogółu statków)
Typ statku	4,1%	2828 wierszy nadanych przez 7 statków (2,79% ogółu statków)
Maksymalne zanurzenie	6,73%	4639 wierszy nadanych przez 12 statków (4,78% ogółu statków)
Port docelowy	8,93 %	6156 wierszy nadanych przez 20 statków (7,97% ogółu statków)

Miarą zaufania przyjmuje się tutaj niezdatność informacji (ang. data sensitive-fault) przesyłanej do użytkownika. Przez termin ten należy rozumieć informację nieprawidłową zarówno z powodów technicznych, jak i tych wynikających z błędów człowieka. Przez niekompletności danych rozumie się brak danej informacji. W procesie poszukiwania ścieżki nie wszystkie dane statku w systemie AIS są wymagane, ale informacja o największym stopniu niezdatności będzie stanowić o poziomie zdolności hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść na morzu.

Analizując dane z tabeli 10, można zauważyć wysoką (22,93% badanych statków) niezdatność informacji na temat kursu rzeczywistego. Informacja ta jest istotna tylko w przypadku braku danych o porcie docelowym danej jednostki. Tylko wtedy kurs ten będzie wykorzystany w procesie poszukiwania ścieżki. W oparciu o tabelę 11 można oszacować, że algorytm hEPN nie będzie mógł poprawnie wyznaczyć pozycję docelową Dd dla 2% wszystkich statków. W takim wypadku, to ilość błędnych wskazań prędkości jednostek (9,02%) najbardziej wpływa na skuteczność hierarchicznej ewolucyjnej metody wyznaczania ścieżek przejść. Niepoprawne wskazanie tego parametru może prowadzić do braku wykrycia potencjalnej sytuacji niebezpiecznej lub też zmuszenia statku do zmiany kursu, co pozwoli uniknąć kolizji, której ryzyko nie występuje. Niestety w pracy (Felski 2010) nie zaznaczono, czy nieprawidłowe wskazanie tego parametru utrzymywało się przez długi okres czasu czy też było chwilowe. W drugim przypadku błędna prędkość nie wpłynie na skuteczność metody, ponieważ rozwiązanie algorytmu hEP/N może być regularnie aktualizowane.

Wiarygodność danych statycznych systemu AIS badano również w pracach (Bailey 2005), (Banachowicz 2008), (Drozd 2007) oraz (Harati-Mokhtari 2007).

By ograniczyć liczbę błędów pochodzących z systemu AIS, możliwa jest ich weryfikacja z informacjami z odczytu radarów (w przypadku pozycji jednostki oraz jej prędkości) systemu VTS. W tym celu można zastosować metodę zaprezentowaną w styczniu 2015 przez Wspólne Centrum Badawcze Unii Europejskiej (WWW – JRC; Papi 2014). Efektywność tej metody polega na braku potrzeby instalowania dodatkowych czujników lub urządzeń i pozwala na weryfikację danych przychodzących z systemu AIS pod kątem nieumyślnych pomyłek, zakłóceń oraz celowych fałszerstw. Metoda może zostać zaimplementowana w głównej sieci stacji bazowych systemu AIS. Łączy ona klasyczną metodę radiolokacyjną z Rozszerzonym Filtrem Kalmana zaprojektowanym w celu śledzenia geodetycznych współrzędnych statków. Metoda została już pozytywnie przetestowana z użyciem rzeczywistych danych zebranych z systemu AIS.

9.6 System LRIT

Równoległym do systemu AIS jest system LRIT (Long Range Identification and Tracking – system śledzenia i identyfikacji dalekiego zasięgu) (Kopacz 2007). Idea jego utworzenia jako niezbędnego narzędzia służącego zwiększeniu ochrony antyterrorystycznej została poruszona na międzynarodowej konferencji zwołanej z inicjatywy IMO zajmującej się ochroną antyterrorystyczną na morzu. Otrzymała się ona w Londynie w grudniu 2002 roku. LRIT znalazło się w pakiecie regulacji związanych z ochroną antyterrorystyczną. Komitet Bezpieczeństwa Morskiego IMO na swej 81 sesji, która odbyła się w maju 2005 roku, zaproponował poprawkę do rozdziału V: bezpieczeństwo żeglugi międzynarodowej konwencji SOLAS 74, dotyczącą ustanowienia systemu LRIT. Ustanowione wtedy prawidło 19-1 mówi, że LRIT stanie się systemem obowiązkowym w międzynarodowej żegludze dla:

- wszystkich statków pasażerskich włącznie z jednostkami szybkimi,
- dla statków towarowych, włączając jednostki szybkie, o wyporności 300 ton i większej,
- dla ruchomych wież wiertniczych.

Prawidło to weszło w życie 1 stycznia 2008 roku.

Inaczej jak w systemie AIS, w systemie LRIT statki same nie wysyłają informacji. Sygnały ze statków wysyłane są w odpowiedzi na sygnały zapytania. Przesyłana ze statków informacja w systemie LRIT to:

- sygnał rozpoznawczy statku (numer identyfikacyjny),
- współrzędne statku,
- czas.

System LRIT działa we wszystkich czterech obszarach łączności systemu GMDSS, tj. w obszarach A1, A2, A3, A4. Za łączność w przypadku trzech pierwszych odpowiada satelitarny system łączności morskiej INMARSAT C. W obszarze A4, poza zasięgiem radiołączności satelitarnej, stacjami zapytującymi i otrzymującymi sygnały ze statków są radiostacje nadbrzeżne pracujące w paśmie częstotliwości fal krótkich. Statki, które nie pracują poza obszarem A1, tj. poza zasięgiem łączności UKF, nie muszą być wyposażone w okrętowe stacje systemu LRIT.

Częstotliwość wysyłania danych ze statku w systemie LRIT jest znacznie niższa niż w systemie AIS i aktualizacja następuje co kilka godzin lub co kilka minut.

Przewiduje się, że oprócz Międzynarodowego Centrum Odbioru Danych LRIT zbudowane zostaną również centra krajowe, regionalne oraz kooperacyjne. Będą one, oprócz międzynarodowego, mogły monitorować ruch statków, stosownie do kompetencji danego rodzaju centrum odbioru danych LRIT.

Krajowe centra odbioru danych LRIT upoważnione do odbioru danych i śledzenia następujących rodzajów statków:

- wszystkich statków, które są w odległości nie większej niż 1000 mil morskich od ich wybrzeży,
- statków, które zdążają do portów danego państwa,
- statków własnej bandery, niezależnie od miejsca, w którym się znajdują.

W systemie LRIT statki, niezależnie do którego z centrów odbioru danych przesyłają sygnały, muszą je wysyłać również do Międzynarodowego Centrum Danych LRIT.

9.7 System VTMIS

Rozwinięciem idei systemu VTS jest system VTMiS (ang. Vessel Traffic Monitoring and Information System), który składa się z kilku systemów składowych (Jagniszczak I., 2001). Jest to system skoordynowany, ale nie scentralizowany, co oznacza, że poszczególne jego elementy pracują niezależnie od siebie. Wyjątkiem jest system SafeSeaNet (np. Polska Platforma Informatyczna Administracji Morskiej). Informacja do tego systemu nie jest dostarczana bezpośrednio przez systemy składowe VTMIS, lecz za pośrednictwem tzw. lokalnych kompetentnych instytucji (LKI), którymi są głównie władze portowe, kapitanaty portów, systemy VTS itp.

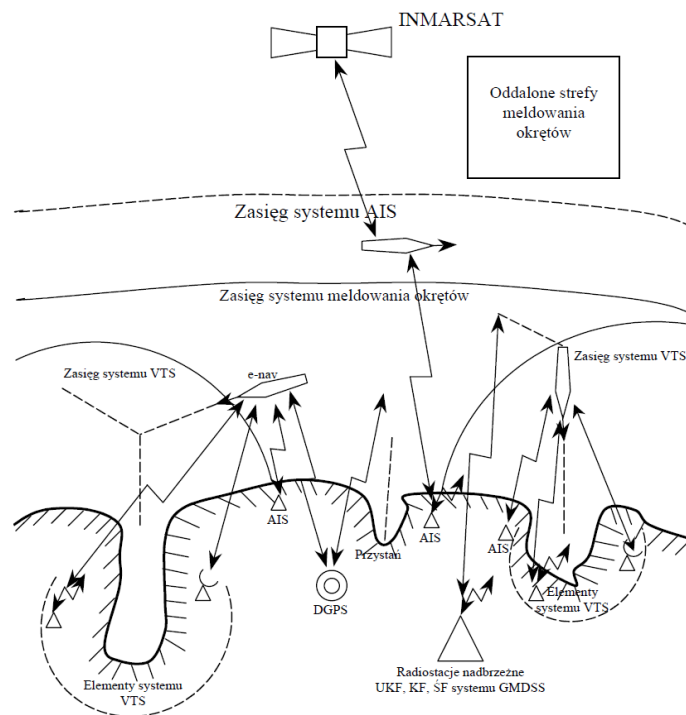
Podstawowymi elementami VTMIS są:

- system VTS,
- system AIS,
- system meldunkowe okrętów (SRS),
- system wspomagania służb morskich (MAS),
- system LRIT,
- krajowy komputerowy system wymiany informacji.

Powyższe systemy nie tworzyłyby skoordynowanego systemu VTMIS, gdyby nie były wspomagane przez dwa inne systemy o podstawowym znaczeniu dla nawigacji, a mianowicie:

- system GNSS,
- światowy morski system łączności alarmowej i bezpieczeństwa, tj. system GMDSS (ang. Global Maritime Distress and Safety System).

System GNSS zapewnia systemom składowym VTMIS niezbędne informacje pozycjonowania, generowane przez globalne systemy pozycjonowania (GPS, GLONASS, a od 2009 r. GALILEO), lub przez regionalne augmentacyjne systemy pozycjonowania (EGNOS, WAAS) albo lokalne naziemne systemy pozycjonowania (DGPS itp.). GMDSS zapewnia składowym elementom systemu VTMIS niezawodną łączność radiową poprzez satelitarny system łączności radiowej INMARSAT oraz radiostacje nadbrzeżne pracujące w pasmach UKF, KF, SF. Elementy systemu VTMIS przedstawiono na rysunku 73.



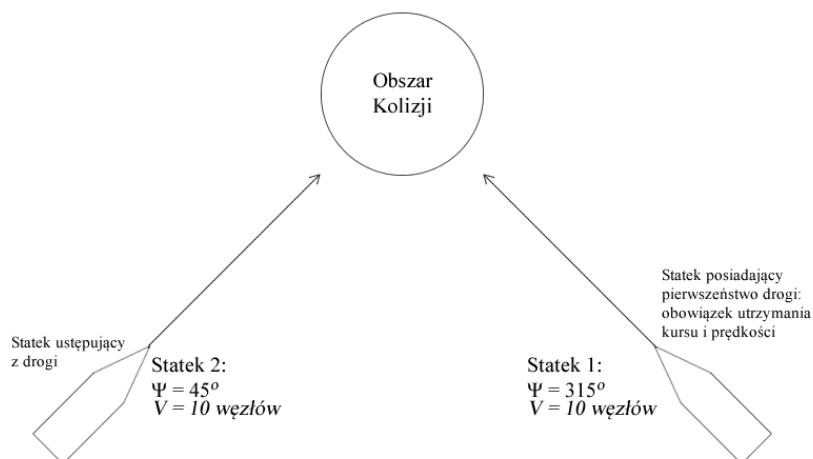
Rysunek 73 - System VTMIS i jego elementy (VTS, AIS, SRS) oraz systemy wspierające ich pracę (DGPS, system satelitarny radiolączności INMARSAT, radiostacje nadbrzeżne UKF, KF, i SF systemu GMDSS) (Jagniszczak 2001).

9.8 Etapy spotkania statków w sytuacji kolizyjnej

Według obowiązujących prawideł COLREG, w warunkach dobrej widzialności pierwszeństwo drogi przysługuje (Rymarz 2004):

- każdemu statkowi wyprzedzanemu,
- statkowi o gorszej zdolności manewrowej w stosunku do statku o określonym stopniu ograniczenia tej zdolności,
- statkowi o napędzie mechanicznym, któremu przecina kurs z lewej burty inny statek o napędzie mechanicznym,
- Statkowi żaglowemu mającemu wiatr z prawej burty w stosunku do innego statku żaglowego mającego wiatr z lewej burty.

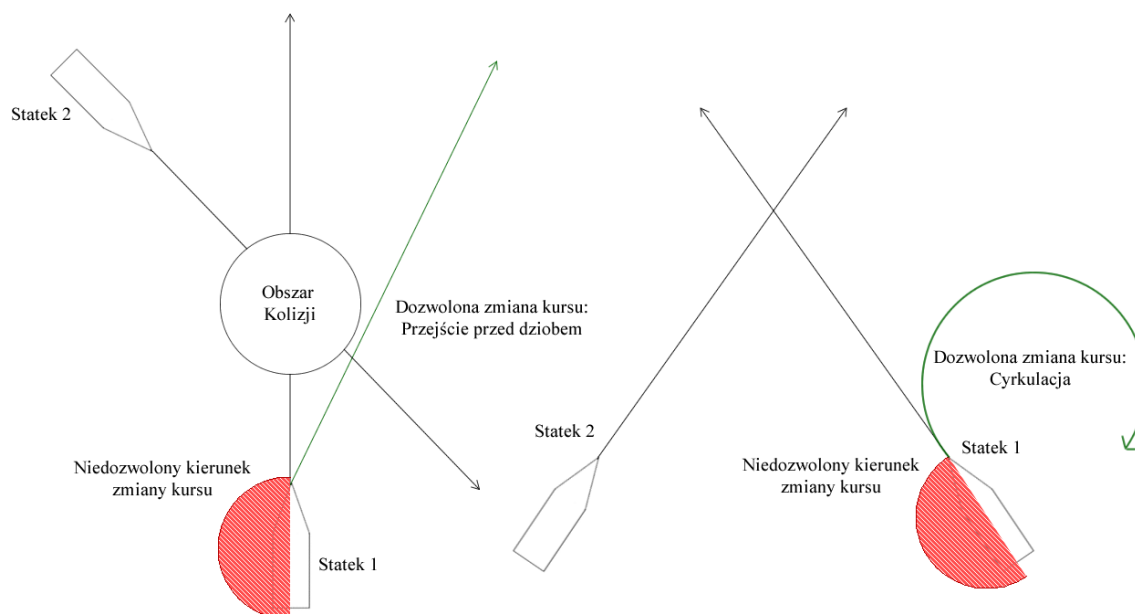
Każdy statek z pierwszeństwem drogi, a będący na kursie kolizyjnym z drugim statkiem, ma obowiązek w tzw. I etapie spotkania zachowania kursu i prędkości.



Rysunek 74 - Etap I spotkania – obowiązek zachowania kursu i prędkości (Stawicki 2008).

Statek 1 może naruszyć obowiązek utrzymania kursu i prędkości, ale tylko w wypadku konieczności uniknięcia kolizji, gdy statek 2 zobowiązany do ustąpienia drogi nie dopełnia tego obowiązku. Rozpoczyna się wówczas tzw. II etap spotkania (rysunek 75). Dzieje się tak jednak jedynie w wypadku, gdy statek 2 nie odpowiada na żadne regulaminowe sygnały dźwiękowe i świetlne nadawane ze statku z pierwszeństwem drogi.

W trakcie tego etapu konieczne jest podjęcie działania przez statek, który ma pierwszeństwo drogi w momencie, gdy ma jeszcze taką możliwość. Możliwe jest to tylko wtedy, gdy obie jednostki mogą się rozjechać zgodnie z przepisami w minimalnej przepisowej odległości. Decydent na tym etapie spotkania nie ma jednak całkowitej swobody wyboru manewru. Przykładowe możliwe manewry zaprezentowano na rysunku 75.

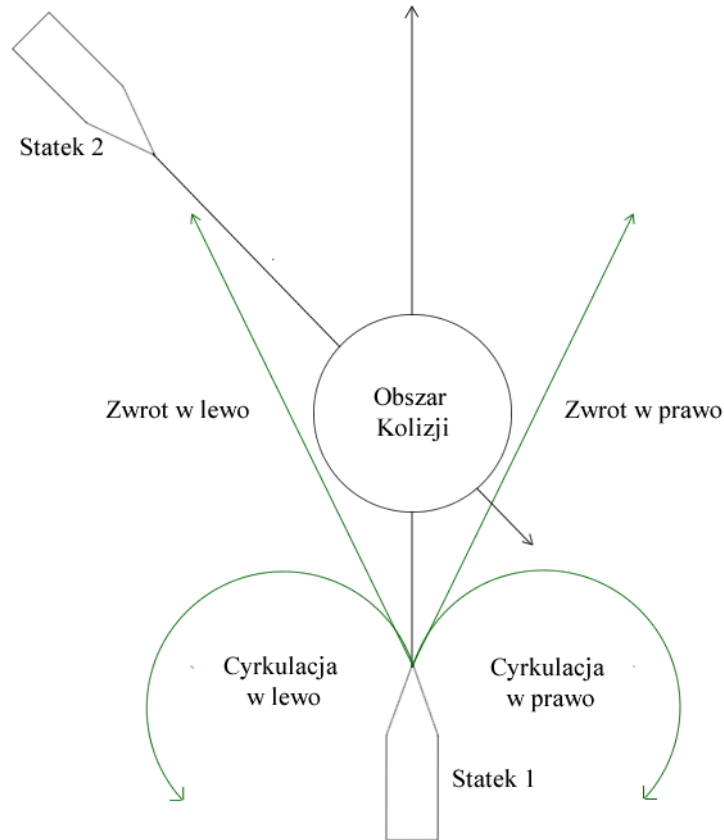


Rysunek 75 - Etap II spotkania.

W takiej sytuacji dozwolone jest, by statek 1 wykonał zwrot w prawo i przeszedł drugiemu statkowi przed dziobem lub wykonał cyrkulację. Możliwe jest również zatrzymanie statku pracą maszyn wstecz i ustąpienia drogi statkowi 2 przed dziobem. Nie należy wykonywać zwrotu w lewo, gdyż najbardziej prawdopodobnym manewrem statku 2 będzie zwrot w prawo.

Warto zaznaczyć, że na tym etapie statek 1, czyli jednostka z pierwszeństwem drogi, musi ominąć statek 2 i zakłada się brak współpracy ze strony drugiej jednostki. Dlatego ważna jest znajomość minimalnej odległości między statkami, kiedy podanie komendy zmiany kursu gwarantuje bezpieczne rozwiązanie potencjalnej sytuacji kolizyjnej. Dalsze zbliżenie pomiędzy statkami jest równoznaczne z końcem etapu II i końcem możliwości uniknięcia zderzenia własnym manewrem zgodnym z przepisami COLREG. Ważna jest możliwość wyznaczenia tej odległości, aczkolwiek nie należy jej utożsamiać z odległością podjęcia manewru ostatniej chwili.

Jeżeli z pewnych przyczyn statek mający pierwszeństwo drogi nie skorzysta z prawa do podjęcia działania na II etapie spotkania, konieczne jest podjęcie tzw. manewru ostatniej chwili. Prawidła COLREG nakazują jednostce z pierwszeństwem drogi podjęcie jakichkolwiek działań w sytuacji, gdy dwa statki są już tak blisko siebie, że wyłącznie przez działanie statku zobowiązanego z pierwszeństwem drogi można jeszcze uniknąć kolizji (rysunek 76).






Rysunek 76 – Manewr ostatniej chwili

Warto tu jednak podkreślić, że manewr ostatniej chwili należy traktować jako rozwiązanie ostateczne i wysoce ryzykowne. Polega on bowiem na znajomości zwrotności statku decydenta podejmującego decyzję. Również odległość między statkami 1 i 2 w chwili podjęcia manewru ostatniej chwili jest jedynie odległością szacunkową, ponieważ nieznane są charakterystyki manewrowe statku 2, czyli statku mającego ustąpić drogi. Należy dodać, że tak rozumiany manewr wcale nie musi doprowadzić do rozejścia się statków, a jedynie może przyczynić się do uniknięcia kolizji. Nie można tutaj mówić o skoordynowanym działaniu dwóch statków, gdyż każdy ma już pełną swobodę zmiany kursu; odległości między statkami stają się coraz mniejsze i nie ma już czasu na uzgadnianie manewru. Dlatego też podejmuje się wszelkie kroki, aby zapobiec jakimkolwiek sytuacjom ryzykownym.

9.9 Statki biorące udział w badaniach dla scenariuszy testowych VII i VIII

9.9.1 Scenariusz testowy VII

1.	2.	3.
 <p>CITY OF ROTTERDAM</p>	 <p>DEPENDENT</p>	 <p>YASHMA</p>
<p>Bandera: Panama</p> <p>Długość x Szerokość: 140m X 22m</p> <p>CALL SIGN: 3FUA7</p> <p>IMO: 9473468</p> <p>MMSI: 372002000</p> <p>Typ statku: Cargo</p> <p>Zanurzenie: 6.3m</p>	<p>Bandera: Netherlands</p> <p>Długość x Szerokość: 90m X 14m</p> <p>CALL SIGN: PHGP</p> <p>IMO: 9341782</p> <p>MMSI: 246546000</p> <p>Typ statku: Cargo</p> <p>Zanurzenie: 3.8m</p>	<p>Bandera: Russia</p> <p>Długość x Szerokość: 90m X 14m</p> <p>CALL SIGN: UEJO</p> <p>IMO: 9555357</p> <p>MMSI: 273353680</p> <p>Typ statku: Cargo</p> <p>Zanurzenie: 7m</p>
<p>Odebrane: 2 minutes wstecz</p> <p>Prędkość/kurs: 13.7kn / 356°</p> <p>Cel podróży: GOTHENBURG, SWEDEN</p> <p>ETA: 2014-04-20 14:30 (UTC)</p>	<p>Odebrane: 2 minutes wstecz</p> <p>Prędkość/kurs: 11.7kn / 172°</p> <p>Cel podróży: SZCZECIN</p> <p>ETA: 2014-04-20 19:00 (UTC)</p>	<p>Odebrane: 1 minute wstecz</p> <p>Prędkość/kurs: 10.6kn / 355°</p> <p>Cel podróży: BELFAST</p> <p>ETA: 2014-04-24 12:00 (UTC)</p>

Rysunek 77 - Jednostki znajdujące się w obszarze morskim analizowanym w scenariuszu testowym VII, dnia 26.04.2014 o godzinie 18:00 – (1) City of Rotterdam, (2) Dependent, (3) Yashma (WWW – AIS).

9.9.2 Scenariusz testowy VIII

TUG302		1. APL AMMAN	2. NP SURATTHANI 3
Bandera: Typ statku: Tug Długość x Szerokość: 0m X 0m Zanurzenie: 0m CALL SIGN: TUG302 IMO: 0 MMSI: 111111302 Odebrane: 41 minutes wstecz (Źródło AIS: 1177 Chonayut Nilpanich) Stan: W toku Prędkość/kurs: 7.8kn / 308° Cel podróży: - ETA: 2014-09-18 07:57 (UTC)		Bandera: Typ statku: Cargo - Hazard D (Recognizable) Długość x Szerokość: 232m X 32m Zanurzenie: 8.7m CALL SIGN: A8LT8 IMO: 9247948 MMSI: 636091298 Odebrane: 58 minutes wstecz (Źródło AIS: 1177 Chonayut Nilpanich) Stan: W toku Prędkość/kurs: 7.8kn / 131° Cel podróży: PASIR PANJANG ETA: -	Bandera: Typ statku: Cargo Długość x Szerokość: 84m X 16m Zanurzenie: 3.6m CALL SIGN: HSB3567 IMO: 9330733 MMSI: 567324000 Odebrane: 2 minutes wstecz (Źródło AIS: 1177 Chonayut Nilpanich) Stan: Stopped Prędkość/kurs: 0.2kn / 236° Cel podróży: LAEMCHABANG ETA: 2014-04-27 12:00 (UTC)
WAN HAI 275		4. ACX DIAMOND	5. KOHINOOR
Bandera: Typ statku: Cargo Długość x Szerokość: 172m X 27m Zanurzenie: 8.4m CALL SIGN: 9V7588 IMO: 9493286 MMSI: 566469000 Odebrane: 2 minutes wstecz (Źródło AIS: 1177 Chonayut Nilpanich) Stan: W toku Prędkość/kurs: 2.8kn / 20° Cel podróży: LAEMCHABANG ETA: 2014-04-27 19:00 (UTC)		Bandera: Typ statku: Cargo Długość x Szerokość: 223m X 30m Zanurzenie: 9.4m CALL SIGN: 9VFL3 IMO: 9360609 MMSI: 565887000 Odebrane: 2 minutes wstecz (Źródło AIS: 1177 Chonayut Nilpanich) Stan: W toku Prędkość/kurs: 2.7kn / 32° Cel podróży: TH LCH ETA: 2014-04-27 20:00 (UTC)	Bandera: Typ statku: Cargo Długość x Szerokość: 177m X 28m Zanurzenie: 6.8m CALL SIGN: 3EUV5 IMO: 9400954 MMSI: 354880000 Odebrane: 8 minutes wstecz (Źródło AIS: 1177 Chonayut Nilpanich) Stan: W toku Prędkość/kurs: 7.1kn / 172° Cel podróży: TH LCH ETA: 2014-04-27 12:00 (UTC)

Rysunek 78. Jednostki znajdujące się w obszarze morskim analizowanym w scenariuszu testowym VIII dnia 26.04.2014 o godzinie 18:00 – (1) Tug302, (2) APL Amman, (3) NP Suratthani (4) Wan Hai 275, (5) Acx Diamond, (6) Kohinoor (WWW – AIS)