

**Rafał Szlarczyński**

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa

# **PLANOWANIE I WIZUALIZACJA BEZPIECZNYCH MANEWRÓW STATKÓW OPARTE NA ZMODYFIKOWANYM DIAGRAMIE COCKCROFTA**

Rękopis dostarczono, luty 2015

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia kontynuację badań autora nad planowaniem bezpiecznych trajektorii statków za pomocą algorytmów ewolucyjnych. Prezentowana metoda poszukuje optymalnego zbioru bezpiecznych trajektorii wszystkich statków biorących udział w spotkaniu. Bieżąca wersja metody zakłada ograniczoną widzialność i obowiązywanie Prawidła 19 Międzynarodowych Przepisów o Zapobieganiu Zderzeniom na Morzu (MPZZM) zamiast Prawideł 11 – 18. Uzupełnieniem metody jest proponowane narzędzie do wizualizacji wszystkich możliwych manewrów antykolizyjnych, które umożliwia nawigatorowi dokonanie szybkiego wyboru bezpiecznej kombinacji nowego kursu i prędkości statku. Artykuł skupia się na zapewnieniu zgodności wyników z Prawidłem 19, oraz z jego interpretacją. Wyniki potwierdzają skuteczność obydwu narzędzi i możliwość zastosowania ich w pokładowym systemie wspomagania decyzji nawigatora.

**Słowa kluczowe:** ograniczona widzialność, algorytmy ewolucyjne, manewry antykolizyjne

## **1. WSTĘP**

Metody automatycznego planowania manewrów antykolizyjnych i bezpiecznych trajektorii w sytuacjach spotkań wielu statków jednocześnie można podzielić na te oparte na grach różniczkowych oraz na narzędziach sztucznej inteligencji. Te pierwsze zostały opisane między innymi w [6] i zakładają one, że proces sterowania statkiem w sytuacji spotkania z wieloma obiektami potencjalnie manewrującymi można zamodelować za pomocą gry rozgrywanej przez poszczególne obiekty, z których każdy kieruje się jakąś strategią. Druga grupa metod obejmuje metody ewolucyjne: optymalizację trajektorii statku własnego [9], optymalizację ścieżki [13, 17] oraz optymalizację manewrów antykolizyjnych [5, 15] i pokrewne: optymalizację trajektorii za pomocą symulowanego wyżarzania [1], czy też algorytmów mrówkowych [14]. Syntezę zastosowań metod sztucznej inteligencji do problemów unikania kolizji na morzu przedstawiono między innymi w [16, 10]. Choć zagadnienie ograniczonej widzialności zostało włączone do metody opartej na grach różniczkowych [7], nie było dotychczas uwzględniane (szczególnie dla wód przybrzeżnych)

w metodach opartych na sztucznej inteligencji. Celem niniejszej pracy jest wypełnienie tej luki. Artykuł stanowi kontynuację prac autora nad metodą Ewolucyjnych Zbiorów Bezpiecznych Trajektorii Statków (EZBTS), przedstawioną wcześniej w [12]. W przeciwieństwie do innych pokrewnych metod, zamiast poszukiwać optymalnej trajektorii statku własnego dla stałych kursów i prędkości statków obcych, szuka ona zbioru optymalnych trajektorii wszystkich obiektów zaangażowanych w spotkanie. Uzupełnieniem metody jest proponowane narzędzie do wizualizacji wszystkich możliwych manewrów antykolizyjnych. Narzędzie to umożliwia nawigatorowi dokonanie szybkiego wyboru bezpiecznej kombinacji nowego kursu i prędkości statku. Artykuł skupia się na elementach zapewniających zgodność planowania i wizualizacji bezpiecznych manewrów z Prawidłem 19 Międzynarodowych Przepisów o Zapobieganiu Zderzeniom na Morzu (MPZZM), które zastępuje Prawidła 11-18 w sytuacji ograniczonej widzialności.

## **2. ZACHOWANIE SIĘ STATKÓW W WARUNKACH OGROUICZONEJ WIDZIALNOŚCI I PROBLEM OPTYMALIZACYJNY**

Zachowanie się statków w warunkach ograniczonej widzialności jest regulowane przez Prawidło 19 MPZZM [4]. Dla niniejszego artykułu kluczowe są dwa jego podpunkty:

- należy unikać zmiany kursu w lewo w stosunku do statków znajdujących się przed trawersem, jeżeli tylko nie zachodzi manewr wyprzedzania,
- należy unikać zmiany kursu w stronę statku znajdującego się na trawersie lub za trawersem.

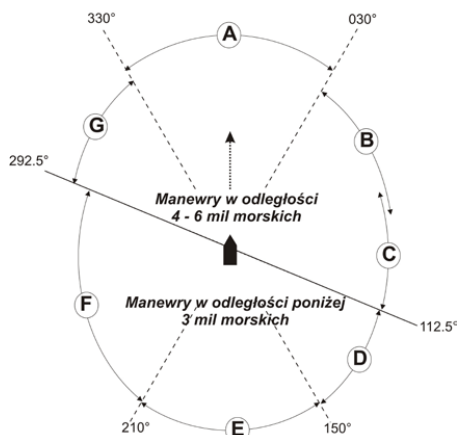
Interpretację prawidła przedstawiono wyczerpująco w [2]. Między innymi zamieszczono tam diagram zmian kursu stosowany dla spotkań statków widzących się na radarze, funkcjonujący w literaturze polskojęzycznej pod nazwą diagramu manewrowego Cockcrofta. Przedstawiono go na rys. 1.

Poniżej podano manewry rekomendowane przez diagram zależnie od sektora, w którym znajduje się echo statku obcego.

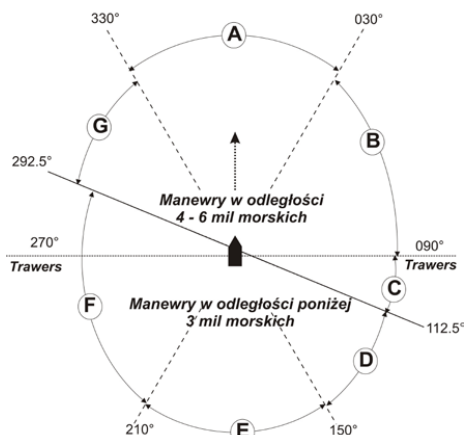
- A. Zwrot w prawo o 60 - 90 stopni.
- B. Zwrot w prawo o taką wartość, żeby echo obiektu obcego znalazło się na radarze na lewym kącie kursowym wynoszącym, co najmniej 30 stopni.
- C. Zwrot w lewo o taką wartość, tak, aby echo znalazło się za rufą lub prawie za rufą.
- D. Zwrot w lewo o taką wartość, tak, aby echo znalazło się za rufą.
- E. Zwrot w lewo o około 30 stopni.
- F. Zwrot w prawo o taką wartość, aby echo znalazło się za rufą.
- G. Zwrot w prawo o taką wartość, aby echo znalazło się na lewym trawersie.

Należy tu zauważyć, że oryginalny diagram z rys. 1 nie jest w pełni zgodny z Prawidłem 19. Dla części sektora C znajdującej się przed trawersem statku własnego manewry w lewo dozwolone są tylko w przypadku wyprzedzania, co nie zostało wyszczególnione w diagramie, abstrahującym od kursu statku obcego. Zgodność z prawidłem można tu osiągnąć poszerzając sektor B kosztem sektora C aż do trawersu statku własnego,

co zilustrowano na rys. 2. Dla dolnej części sektora B wystarczające będą wówczas również takie manewry w prawo, dla których echo obiektu obcego znajdzie się na lewym kącie kursowym mniejszym od 30 stopni.



Rys. 1. Diagram manewrowy Cockcrofta



Rys. 2. Zmodyfikowany diagram manewrowy Cockcrofta (sektor B poszerzony kosztem sektora C)

Zgodnie z interpretacją z [2], dla echa statku obcego w sektorach od A do C lub w sektorze G statek własny powinien zmienić kurs w odległości od 4 do 6 mil morskich. Natomiast statek obcy, którego echo widać w jednym z sektorów D-F sam powinien wykonać manewr antykolizyjny będąc w takiej odległości. Dlatego też zmiany kursu statku własnego dla echa w tych sektorach są polecane, gdy statek obcy nie wykona należytego manewru, a odległość zmaleje do 3 mil morskich.

W podejściu ewolucyjnym proponowanym przez autora celem optymalizacji jest znalezienie zbioru trajektorii, który minimalizuje średnią stratę czasu lub stratę drogi wynikłą z manewrowania, jednocześnie spełniając następujące warunki:

- żadne z ograniczeń statycznych nie jest naruszone,
- domena żadnego ze statków nie jest naruszona [3],
- zmiany kursu i odległości, w jakich są wykonywane są zgodne z Prawidłem 19 i zmodyfikowanym diagramem Cockcrofta,
- redukcja prędkości może być stosowana wyłącznie, jako alternatywa zmiany kursu (a nie w połączeniu ze zmianą kursu) dla statków na lewej burcie lub przed dziobem,
- manewry wykonywane przez każdy ze statków są wystarczające dla uniknięcia kolizji, nawet dla niezmiennych kursów i prędkości pozostałych statków.

Założono, że dostępne są następujące dane:

- ograniczenia statyczne (np. mielizny, przeszkody i inne ograniczenia toru wodnego),
- pozycje, kursy i prędkości wszystkich statków zaangażowanych w spotkanie,
- dodatkowe parametry statku własnego umożliwiające oszacowanie dynamiki jego manewrów (długość statku, promień cyrkulacji, prędkość kątowna zwrotu dla zmian kursu).

Ograniczenia statyczne i pokrewne parametry odczytywane są z map cyfrowych (ang. Electronic Navigational Charts - ENC) wyświetlanych za pomocą systemu obrazowania map elektronicznych i informacji nawigacyjnych (ang. Electronic Chart Display and Information System - ECDIS). Parametrów ruchu statków dostarczają automatyczny system identyfikacji (ang. Automatic Identification System - AIS) oraz automatyczny system śledzenia statków za pomocą radaru (ang. Target Tracking).

Dodatkowo przy projektowaniu metody przyjęto następujące założenia:

- Statki poruszają się już z bezpieczną prędkością. Jeżeli nie, redukcja jest automatycznie polecana przez system.
- Jeżeli znalezienie bezpiecznego rozwiązania nie uda się w zadanym czasie (domyślnie 30 sekund) dla echa w sektorach od A do C oraz G, prędkość statku jest zmniejszana do minimum umożliwiającego bezpieczne nawigowanie, przy czym redukcja prędkości wyklucza manewry kursem w przypadku echa w sektorach A i G. Natomiast dla sektorów od D do F stosowane jest zwiększenie prędkości do zadanej wartości, jeżeli sam manewr kursem nie jest wystarczający.
- Początkowa odległość pomiędzy statkami wynosi co najmniej 4 mile morskie. W przeciwnym razie (szczególnie, jeżeli domena statku została już naruszona, lub odebrano sygnał mgłowy) wskazane jest jak najszybsze wykonanie manewru antykolizyjnego bez uprzedniego planowania powrotu na kurs lub powrotu na trajektorię. Dla takich sytuacji zaprojektowano narzędzie przedstawione w punkcie 5.

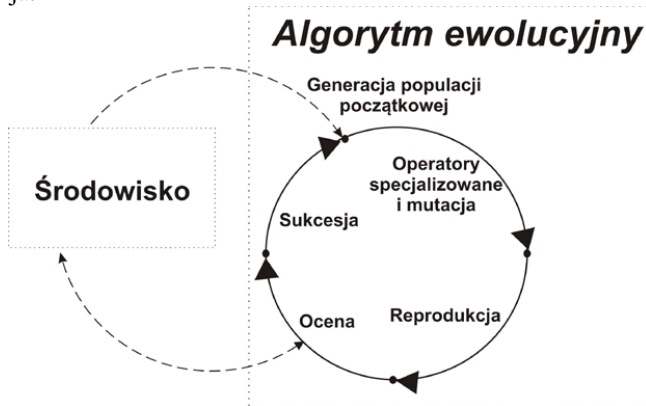
### 3. METODA EWOLUCYJNA

Problem optymalizacyjny z rozdziału 2 rozwiązywany jest za pomocą specjalnie zmodyfikowanego (zamieniona kolejność stosowania operatorów specjalizowanych i reprodukcji) algorytmu ewolucyjnego przedstawionego na rys. 3.

W metodzie osobnikami (odpowiednikami chromosomów) są nie poszczególne trajektorie, lecz zbiory trajektorii wszystkich statków. Po wygenerowaniu populacji początkowej jest ona następnie przetwarzana w cyklu ewolucyjnym składającym się z czterech faz: operatorów specjalizowanych i mutacji, reprodukcji, oceny oraz sukcesji. Najlepsze zbiory trajektorii mają największą szansę znalezienia się w następnym pokoleniu, co skutkuje postępowaniem w stronę rozwiązania końcowego. Główne zmiany w nowej wersji metody dotyczą operatorów specjalizowanych oraz funkcji oceny przystosowania osobników (zbiorów trajektorii). Operatory specjalizowane mają tu na celu eliminację kolizji i naruszeń Prawidła 19, przy czym ich działanie jest uproszczone i częściowo niedeterministyczne. Dlatego też kolizje i naruszenia, których nie udało się usunąć, zostają wykryte i obłożone karami w fazie oceny, tak, aby zmniejszyć prawdopodobieństwo przejścia tych osobników do następnego pokolenia.

Wykrywanie naruszeń ograniczeń statycznych oparte jest na sprawdzaniu dla każdego odcinka danej trajektorii, czy na mapie cyfrowej nie przecina on, ani nie przebiega w pobliżu komórki reprezentującej obszar niedostępny bądź zabroniony. Natomiast kolizje z innymi statkami rozumiane są tu jako naruszenia ich domen. Założono, że każdą trajektorię można przybliżyć sekwencją odcinków połączonych łukami odzwierciedlającymi dy-

namikę manewru. Dla danej pary statków sprawdzane jest, które z odcinków przebywane są w tym samym czasie i następnie wyznaczane są dla nich punkty i odległości największego zbliżenia (ang.: Closest Point of Approach – CPA, Distance at the Closest Point of Approach - DCPA) oraz współczynniki naruszenia domeny [11]. Jeśli domena któregoś ze statków jest naruszona, w punkcie największego zbliżenia, lub na końcu odcinka, rejestrowana jest kolizja.



Rys. 3. Zmodyfikowany schemat algorytmu ewolucyjnego

Oprócz wykrywania kolizji sprawdzane jest również, w którym sektorze (rys. 2) znajdowało się echo obiektu obcego gdy przekroczył on linię odległości 6 mil morskich od statku własnego. Jeśli manewr statku jest niezgodny z odpowiednim dla tego sektora, to jego trajektoria jest następnie modyfikowana przez dodanie lub przesunięcie punktów zwrotu. W rezultacie wstawiany jest najpierw manewr antykolizyjny zgodny z diagramem a potem manewr powrotu na trajektorię. W metodzie założono, że wykrywane i karane będą nie tylko naruszenia Prawidła 19, lecz również reguł zobrazowanych w diagramie Cockcrofta. Naruszenia te wykrywane są według następującego algorytmu wykonywanego oddzielnie dla każdej pary statków:

1. Trajektorie danej pary statków (własnego i obcego) sprawdzane są odcinek po odcinku w celu wykrycia punktu, gdy statki będą w odległości 6 mil morskich od siebie.
2. Na podstawie pozycji i kursów obu statków wyznaczany jest sektor, z którego zbliża się echo statku obcego.
3. Na podstawie sektora i przewidywanej odległości największego zbliżenia lub przewidywanego współczynnika naruszenia domeny sprawdzane jest, czy zachodzi konieczność wykonania manewru, a jeśli tak, to w jakiej odległości od statku obcego (4-6 mil morskich dla sektorów A-C oraz G; 3 mile morskie dla sektorów D-F).
4. Dla sektorów A-C oraz G sprawdzane jest, czy statek własny wykonał odpowiedni manewr w odpowiedniej odległości i czy byłby on wystarczający nawet przy założeniu braku manewrów statku obcego. Jeżeli nie, to rejestrowane jest naruszenie diagramu.
5. Dla sektorów D-F analizowane jest, czy statek obcy wykonał odpowiedni manewr (taki, jaki wykonałby na jego miejscu statek własny według punktu 4.). Jeżeli tak, to

jakikolwiek manewr statku własnego wykonany w odległości większej niż 4 mile morskie rejestrowany jest jako naruszenie diagramu.

6. Jeżeli statek obcy zbliżający się z jednego z sektorów A-C nie wykonał odpowiedniego manewru, a odległość do statku własnego zmalała do 3 mil morskich, powinien nastąpić manewr statku własnego. Jeżeli statek własny nie wykonał manewru, lub wykonał go niewłaściwie (nieodpowiednia zmiana kursu, odległość lub naruszenie domeny), to rejestrowane jest naruszenie diagramu.

Bezpośrednie usuwanie naruszeń Prawidła 19 lub reguł zobrazowanych w diagramie Cockcrofta odbywa się za pomocą operatorów specjalizowanych. Ponadto naruszenia te uwzględnione są w funkcji przystosowania algorytmu ewolucyjnego. Funkcja ta, odzwierciedlająca kryteria optymalizacji i ograniczenia [8], jest sumą cząstkowych wartości funkcji przystosowania otrzymanych dla poszczególnych trajektorii i wyraża się wzorem:

$$fitness = \sum_{i=1}^n [track\_fitness_i] \quad (1)$$

gdzie  $track\_fitness_i$  to iloczyn czynników zależnych od straty drogi, naruszeń ograniczeń statycznych, kolizji z innymi statkami oraz naruszeń Prawidła 19.

## 4. PRZYKŁADOWE WYNIKI

Założono, że w sytuacji ograniczonej widzialności, nawigator może być zmuszony do szybszego podejmowania decyzji, a zatem system powinien szybciej udostępnić mu odpowiednie dane (proponowaną sekwencję manewrów). Dlatego też maksymalny czas obliczeń został ustalony na 30 sekund, co w przypadku środowiska symulacji pozwalało na około 100 pokoleń ewolucji. Zwykle po około 50 pokoleniach dostępne były przybliżone wyniki, a następne 50 pokoleń służyło minimalizacji straty drogi w ramach przyjętego kierunku manewrów. W przykładach przyjęto eliptyczną domenę statku, zbliżoną kształtem do domeny Coldwella, ale znacznie powiększoną (rys. 11-18) – domyślnie minimalna dopuszczalna odległość od obiektu obcego została ustalona na:

- 2 mile morskie dla odległości od lewej burty lub rufy,
- 3 mile morskie dla odległości od prawej burty,
- 4 mile morskie dla odległości od dziobu.

Większy sektor dziobowy domeny statku obcego skutkuje faworyzowaniem przez metodę przechodzenia za rufą zamiast przed dziobem.

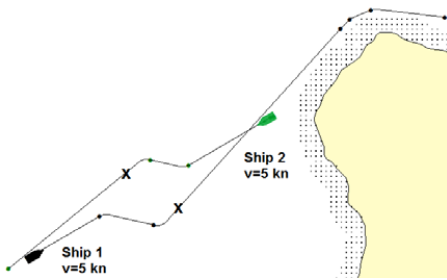
Poniżej przedstawione zostaną przykłady wyników zwracanych przez metodę dla sytuacji spotkań statków w warunkach ograniczonej widzialności na wodach ograniczonych. Scenariusze spotkań (wymienione w tablicy 1.) zostały zaprojektowane tak, by obejmowały wszystkie sektory z rys. 2. Przypadek Statku 2 zbliżającego się z sektora G jest odwróceniem scenariusza 2 (zamiana statków), dlatego nie został uwzględniony oddzielnie. Sektory wyznaczane są, gdy odległość między statkami zmaleje do 6 mil morskich (odległości początkowe na rysunkach są czasem większe).

Tablica 1

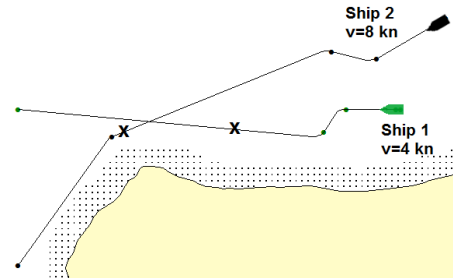
## Scenariusze spotkań statków

Numer scenariusza	Sektor, z którego Statek 2 zbliża się do Statku 1.	Sektor, z którego Statek 1 zbliża się do Statku 2.	Spodziewane manewry statków
1.	A	A	Obydwa statki zmieniają kurs w prawo.
2.	B	G	Obydwa statki zmieniają kurs w prawo.
3.	C	G	Statek 1 zmienia kurs w lewo, a Statek 2 w prawo
4.	D	G	Statek 2 zmienia kurs w prawo i nie jest konieczny manewr Statku 1
5.	E	A	Statek 2 zmienia kurs w prawo i nie jest konieczny manewr Statku 1
6.	F	A	Statek 2 zmienia kurs w prawo i nie jest konieczny manewr Statku 1

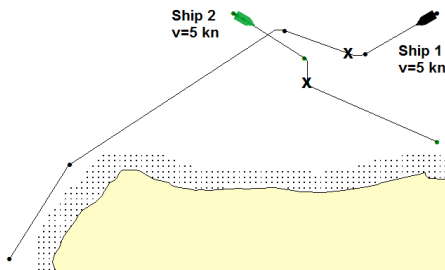
Na rys. 4-9 przedstawiono wyniki otrzymane dla scenariuszy z tabeli 1. Podano tam prędkości w węzłach i zaznaczone pozycje statków podczas wymijania. Dla każdego scenariusza statki są początkowo na kursach kolizyjnych.



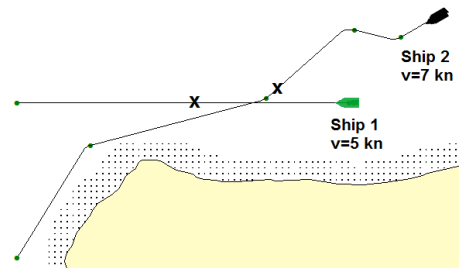
Rys. 4. Rozwiązanie znalezione dla scenariusza 1



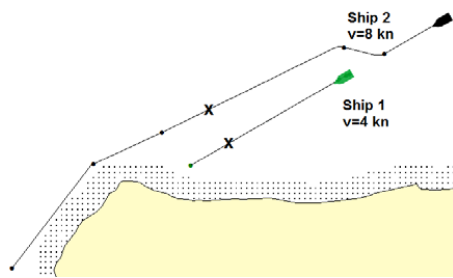
Rys. 6. Rozwiązanie znalezione dla scenariusza 3



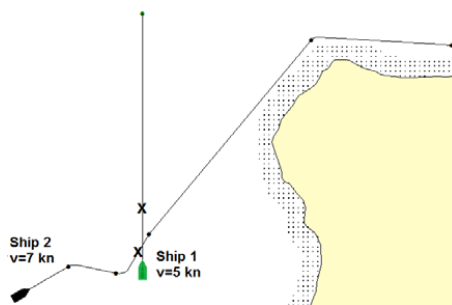
Rys. 5. Rozwiązanie znalezione dla scenariusza 2



Rys. 7. Rozwiązanie znalezione dla scenariusza 4



Rys. 8. Rozwiązanie znalezione dla scenariusza 5



Rys. 9. Rozwiązanie znalezione dla scenariusza 6

Wykonane manewry są zgodne z diagramem Cockcrofta, przy czym każdorazowo jeden ze statków zmuszony jest dodatkowo do omińnięcia lądu. Na rys. 7 i 9 Statek 2 przechodzi za rufą Statku 1. W przypadku rys. 7 Statek 2 rozpoczyna manewr w odległości większej od założonych 6 mil morskich, gdyż w przeciwnym razie musiałyby przejść przed dziobem lub znacznie nadłożyć drogi. Na rys. 6 Statek 2 przechodzi przed dziobem, gdyż parametry ruchu obydwu statków czynią przejście za rufą niemal niemożliwym. We wszystkich sześciu scenariuszach kierunek zmian kursu jest właściwy, domena żadnego ze statków nie jest naruszona, a redukcja prędkości nie była konieczna.

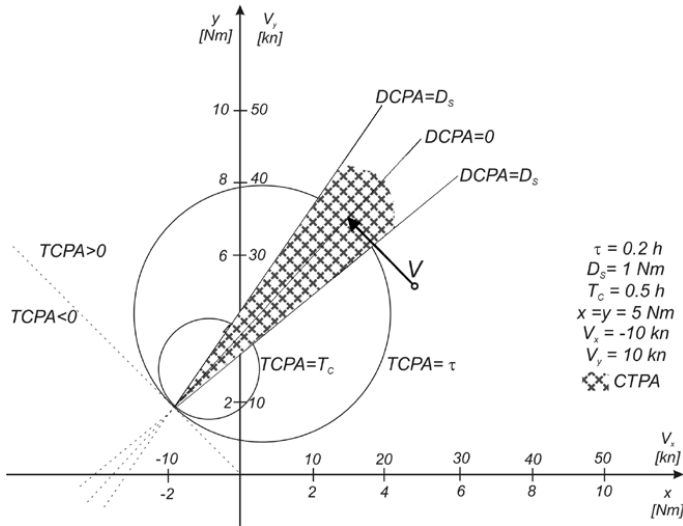
## 5. WIZUALIZACJA MANEWRÓW ANTYKOLIZYJNYCH

Proponowane narzędzie do wizualizacji manewrów antykolizyjnych stanowi funkcjonalne uzupełnienie przedstawionej we wcześniejszych punktach ewolucyjnej metody planowania trajektorii. W sytuacji, gdy mamy już do czynienia z nadmiernym zbliżeniem do zagrażającego kolizją obiektu (lub krótkim czasem pozostającym do potencjalnej kolizji) planowanie trajektorii nie zawsze jest możliwe. Bieżące ryzyko jest już wówczas na tyle duże, że powinno być jak najszybciej zmniejszone bez względu na aspekt ekonomiczny. Głównym celem staje się wtedy zaplanowanie tzw. „manewru ostatniej szansy” tzn. takiego, który minimalizuje ryzyko kolizji pomijając wielkość wynikającą z tego manewru straty drogi, czasu bądź paliwa. Wizualizacji ryzyka kolizji, a zarazem wizualizacji wszystkich możliwych manewrów antykolizyjnych. Zaproponowane zobrazowanie umożliwia nawigatorowi szybki wybór bezpiecznej kombinacji kursu i prędkości statku własnego, tak by uniknąć naruszenia domeny statku własnego i domen obiektów obcych a jednocześnie zapewnić zgodność z diagramem manewrowym Cockcrofta.

Zobrazowanie oparte jest na metodzie Obszarów Zagrożenia Kolizyjnego (OZK) przedstawionej w [6, 7], przy czym oryginalne zobrazowanie rozszerzone zostało o uwzględnienie domen statków i dynamiki manewrów. Oryginalna metoda OZK (ang. Collision Threat Parameters Area – CTPA) korzysta ze sprzężonego układu współrzędnych (rys. 10), w którym osie X i Y oznaczają jednocześnie odpowiednie współrzędne położenia



i prędkości statku własnego znajdującego się w początku układu. Dla danego statku obcego (o wektorze prędkości  $V$  na rys. 10) analitycznie wyznaczyć można równania prostych, dla których odległość największego zbliżenia dwu statków będzie zerowa ( $DCPA=0$  na rys. 10) lub równa przyjętej odległości bezpiecznej ( $DCPA=D_S$ ). Czas pozostający do osiągnięcia odległości największego zbliżenia ( $TCPA$ ) jest odwrotnie proporcjonalny do odległości od punktu przecięcia się prostych. Zaznaczony wycinek koła ograniczony przez proste  $DCPA=D_S$  oznacza kolizyjne kombinacje własnego kursu i prędkości.

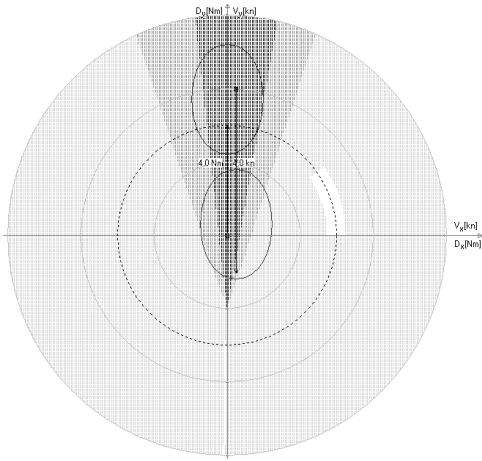


Rys. 10. Metoda Obszarów Zagrożenia Kolizyjnego (CTPA)

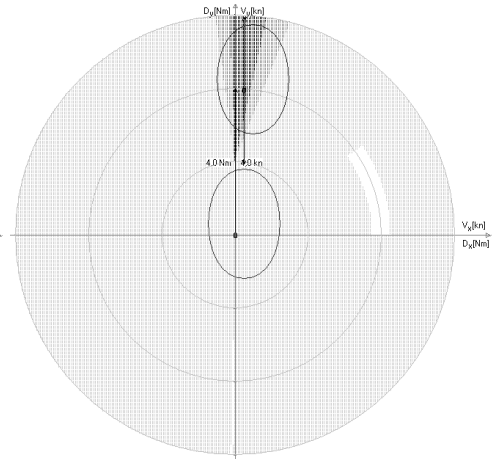
W proponowanym zmodyfikowanym zobrazowaniu zamiast dotychczasowego analitycznego wyznaczania bezpiecznych kombinacji kursu i prędkości zastosowany jest numeryczny algorytm deterministyczny (analityczne rozwiązanie rozszerzonego problemu nie jest możliwe). W algorytmie dla każdej kombinacji kursu i prędkości (reprezentowanej przez piksel na wyświetlaczu) oddzielnie sprawdzane jest, czy domena żadnego ze statków nie zostanie naruszona w przypadku wyboru takiego manewru oraz, czy manewr jest zgodny z diagramem z rys. 2. Przyjęto następującą reprezentację graficzną niedozwolonych kombinacji kursu i prędkości za pomocą kolorów:

- Czarny – kombinacje prowadzące do krytycznego naruszenia domeny statku (duże prawdopodobieństwo kolizji).
- Ciemnoszary – kombinacje prowadzące do niewielkiego naruszenia domeny statku (duże prawdopodobieństwo przejścia statków w niewielkiej odległości od siebie).
- Jasnoszary – kombinacje bezpieczne, lecz sprzeczne z diagramem z rys. 2.
- Białe – kombinacje bezpieczne i zgodne z diagramem z rys. 2 (manewry rekomendowane).

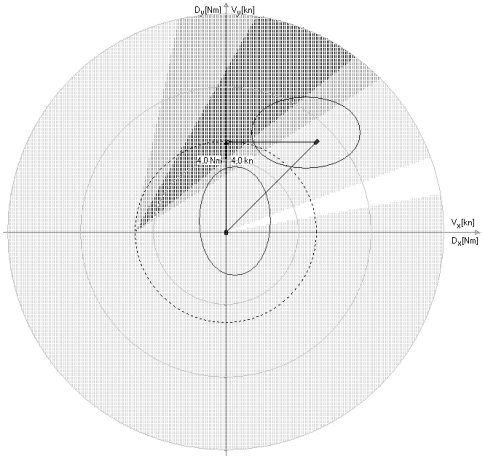
Przykładowe wyniki – wizualizacje możliwych manewrów przedstawiono na rys. 11-18.



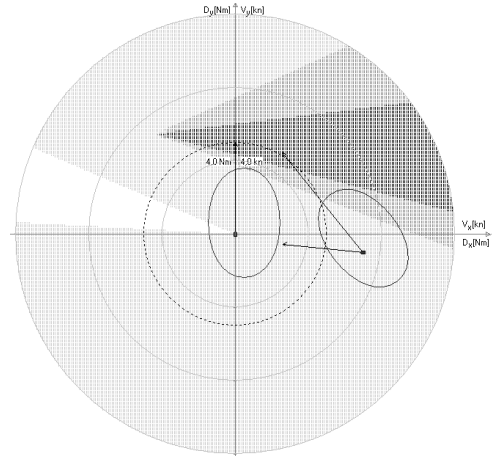
Rys. 11. Spotkanie ze statkiem zbliżającym się z sektora A



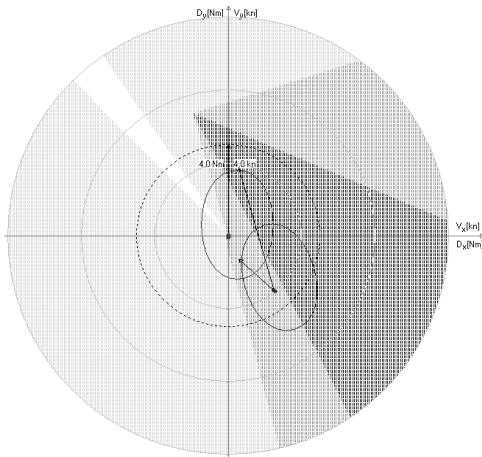
Rys. 12. Wyprzedzanie statku w sektorze A



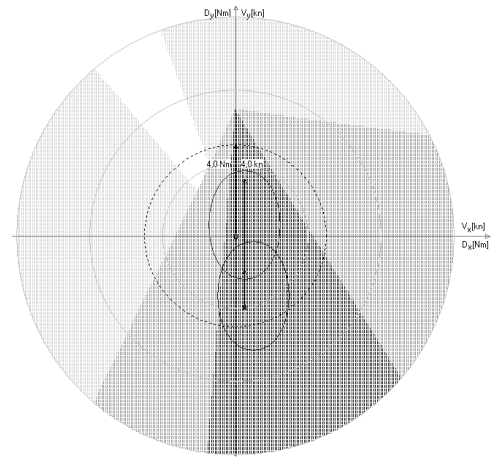
Rys. 13. Spotkanie ze statkiem w sektorze B



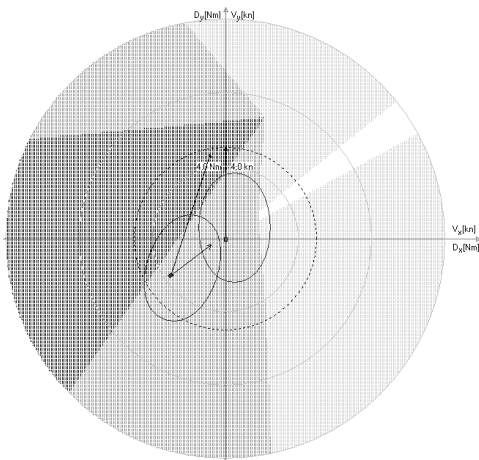
Rys. 14. Spotkanie ze statkiem w sektorze C



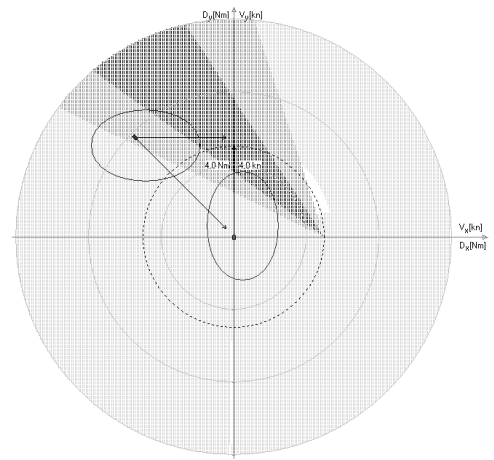
Rys. 15. Spotkanie ze statkiem w sektorze D



Rys. 16. Spotkanie ze statkiem w sektorze E



Rys. 17. Spotkanie ze statkiem w sektorze F



Rys. 18. Spotkanie ze statkiem w sektorze G

Dwa przykłady statków obcych w sektorze A pokazano na rys. 11 (statki idące wprost lub prawie wprost na siebie) i rys. 12 (wyrzedzanie). W obydwu przypadkach statek własny powinien wykonać manewr od 60 do 90 stopni na prawą burtę, jednakże nie powinien on być połączony ze zmianą prędkości, stąd zaznaczony na biało jest wycinek okręgu, zamiast wycinka koła. Dotyczy to również sektora G (rys. 18), gdzie także rekomendowany zbiór manewrów jest zaznaczony, jako wycinek okręgu dodatkowo ograniczony z lewej strony obszarem kolizyjnym (ciemnoszare tło), co wynika z przyjęcia dużej domeny statku i 3-minutowego czasu na decyzję nawigatora. We wszystkich pozostałych przypadkach manewr kursem i prędkością jednocześnie jest możliwy a rozwiązania zaznaczono wycinkami kół odpowiadających manewrom wymienionym w diagramie z rys. 2: na prawą burtę dla sektora B (rys. 13) i F (rys. 17) oraz na lewą burtę dla sektora C (rys. 14), D (rys. 15) i E (rys. 16).

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono ewolucyjną metodę planowania bezpiecznych trajektorii statków w warunkach ograniczonej widzialności. Artykuł skupia się na zagadnieniu zgodności manewrów z Prawidłem 19 i diagramem Cockcrofta, które to zagadnienie, nie było wcześniej uwzględniane w pokrewnych metodach opartych na narzędziach sztucznej inteligencji. Metoda zawiera szybkie algorytmy wykrywania kolizji oraz naruszeń reguł zobrazowanych w diagramie Cockcrofta. Przeprowadzone symulacje komputerowe potwierdzają skuteczność metody dla założonego zakresu jej działania: przy wystarczająco dużych odległościach początkowych i umiarkowanych prędkościach jest ona w stanie szybko wskazać bezpieczne manewry antykolizyjne, dbając jednocześnie, by strata drogi nie była zbyt duża. Manewry proponowane przez metodę mogą uwzględniać redukcję prędkości, choć na ogół nie jest ona niezbędna. Stosunkowo rzadko rekomendowane jest przejście przed dziobem drugiego statku, a jeżeli tak, to w znacznej odległości. Manewry planowane są z dodatkowym marginesem bezpieczeństwa – każdy z nich byłby wystarczający, nawet przy braku manewru drugiego statku. Uzupełnieniem metody jest proponowane narzędzie do wizualizacji wszystkich możliwych manewrów antykolizyjnych, które umożliwia nawigatorowi dokonanie szybkiego wyboru bezpiecznej kombinacji nowego kursu i prędkości statku w sytuacji bezpośredniego zagrożenia kolizją. Ogółem, metoda planowania trajektorii uzupełniona o dodatkowe zobrazowanie antykolizyjne może być użytecznym narzędziem wspomagającym pracę nawigatora w typowych sytuacjach spotkań statków w warunkach ograniczonej widzialności.

### Bibliografia

1. Cheng X., Liu Z.: Trajectory Optimization for Ship Navigation Safety Using Genetic Annealing Algorithm. Proceedings of ICNC 2007 Third International Conference on Natural Computation, 4, 2007, s. 385 – 392.
2. Cockcroft A.N., Lameijer J.N.F.: A Guide to Collision Avoidance Rules. Butterworth-Heinemann. 2011.
3. Coldwell T.G.: Marine Traffic Behaviour in Restricted Waters. The Journal of Navigation. 36, Cambridge 1983.
4. COLREGS: Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea. International Maritime Organization, London 1972 [z poprawkami z 2009 r.].
5. Ito M., Feifei Z., Yoshida N.: Collision avoidance control of ship with genetic algorithm. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications, vol. 2, 1999, s. 1791 - 1796.
6. Lenart A.S.: Collision threat parameters for a new radar display and plot technique. The Journal of Navigation, 36, Cambridge 1983, s. 404–410.
7. Lenart A.S.: Manoeuvring to required approach parameters — CPA distance and time. Annual of Navigation, 1/99, Gdynia 1999, s. 99-108.
8. Lisowski J.: The Dynamic Game Models of Safe Navigation, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 1, no. 1, Gdynia 2007.
9. Lisowski J.: The Sensitivity of Safe Ship Control in Restricted Visibility at Sea, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 6, no. 1, Gdynia 2012.
10. Michalewicz Z., Fogel D.B.: How To Solve It: Modern Heuristics. Springer-Verlag, Berlin 2004.
11. Smerzhalski R., Michalewicz Z.: Modelling of a Ship Trajectory in Collision Situations at Sea by Evolutionary Algorithm, IEEE Transactions on Evolutionary Computation. No. 3 Vol. 4, 2000, s. 227-241.

12. Statheros T., Howells G., McDonald-Maier K.: Autonomous Ship Collision Avoidance Navigation Concepts, Technologies and Techniques, *The Journal of Navigation*, 61, Cambridge 2008, s. 129–142.
13. Szlapeczynski R.: A unified measure of collision risk derived from the concept of a ship domain, *The Journal of Navigation*, 59, Cambridge 2006, s. 477-490.
14. Szlapeczynski R.: Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories Within Traffic Separation Schemes. *The Journal of Navigation*, 66, Cambridge 2012, s. 65-81.
15. Tam C.K., Bucknall, R.: Path-Planning Algorithm for Ships in Close-Range Encounters. *Journal of Marine Science Technology*, 15, 2010, s. 395–407.
16. Tsou M. C., Hsueh C. K.: The Study of Ship Collision Avoidance Route Planning by Ant Colony Algorithm. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(5), 2010, s. 746–756.
17. Tsou M. C., Kao S.-L., Su C.-M.: Decision Support from Genetic Algorithms for Ship Collision Avoidance Route Planning and Alerts. *The Journal of Navigation*, 63, Cambridge 2010, s. 167–182.
18. Yang L.L., Cao S.- H., Li B.Z.: A Summary of Studies on the Automation of Ship Collision Avoidance Intelligence. *Journal of Jimei University (Natural Science)*, 2, 2006.
19. Zeng X.: Evolution of the Safe Path for Ship Navigation. *Applied Artificial Intelligence*, 17, 2003, s. 87–104.

### **EVOLUTIONARY PLANNING OF SAFE SHIP TRACKS BASED ON A MODIFIED COURSE ALTERATION DIAGRAM**

**Summary:** The paper presents the continuation of the author’s research on ship track planning by means of Evolutionary Algorithms (EA). The method uses EA to search for an optimal set of safe tracks for all ships involved in an encounter. The current version of the method assumes restricted visibility, when Rule 19 of COLREGS [4] applies instead of Rules 11 to 18. The method is supplemented by a collision avoidance visualisation tool, which enables the navigator to choose quickly a safe combination of own course and speed. The paper is focused on compliance with Rule 19 of COLREGS. The experiments’ results confirm the effectiveness of both tools and suggest that they could be applied in on-board decision support systems.

**Keywords:** restricted visibility, evolutionary algorithms, collision avoidance manoeuvres