

## NAWIGACYJNY SYSTEM WSPOMAGANIA DECYZJI (NAVDEC) W ZAPOBIEGANIU KOLIZJI NA MORZU

### STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono nawigacyjny system wspomaganie decyzji na statku morskim NAVDEC. System realizuje obok podstawowych funkcji informacyjnych zadania typowe dla systemów wspomaganie decyzji. Scharakteryzowano podstawowe moduły systemu, w tym pozyskiwania i integracji danych z urządzeń i systemów nawigacyjnych, analizy i oceny sytuacji oraz wypracowania manewru. Przedstawiono wybrane algorytmy zaimplementowane w wymienionych modułach. System testowano zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i rzeczywistych - na statku morskim. Działanie systemu w sytuacjach spotkań statków w celu unikania kolizji przedstawiono na wybranych przykładach zarejestrowanych w czasie badań symulacyjnych i rzeczywistych.

### WPROWADZENIE

Rozwój technologii informacyjnych IT i ICT stwarza coraz szersze możliwości wspomaganie podejmowania decyzji przez człowieka, co w istotny sposób przyczynia się do ograniczenia popełnianych przez niego błędów. Dotyczy to także żegluga morskiej, gdzie jako jedną z głównych przyczyn kolizji statków podaje się błąd człowieka [1, 7, 14, 15].

Do wspomaganie procesów decyzyjnych stosowane są powszechnie różnorodne urządzenia i systemy informacyjne, usprawniające procesy pozyskiwania, integracji, przetwarzania i udostępniania informacji, a w niektórych przypadkach analizy i oceny sytuacji i generowania na tej podstawie ostrzeżeń (warnings) oraz alarmów (alarms).

Systematycznie zwiększający się zakres i liczba danych podlegających przetwarzaniu oraz wzrastająca złożoność obliczeniowa stosowanych modeli przyczynia się do szybkiego rozwoju systemów wspomaganie decyzji (Decision Support Systems). Ich podstawową cechą charakterystyczną jest zastosowanie baz modeli i baz wiedzy wykorzystywanych w rozwiązywaniu między innymi takich zadań decyzyjnych jak analiza i ocena, wnioskowanie, weryfikacja efektywności decyzji, optymalizacja. Oznacza to poszerzenie dotychczasowych funkcji systemów nawigacyjnych o zadania analizy i oceny sytuacji oraz wyznaczanie i proponowanie nawigatorowi rozwiązania/rozwiązań sytuacji niebezpiecznych. Wymienione funkcje realizuje opracowany w AM w Szczecinie nawigacyjny system wspomaganie decyzji na statku morskim NAVDEC, aktualnie testowany w warunkach rzeczywistych.

## 1. SYSTEM WSPOMAGANIA DECYZJI

### 1.1. Zadania systemu

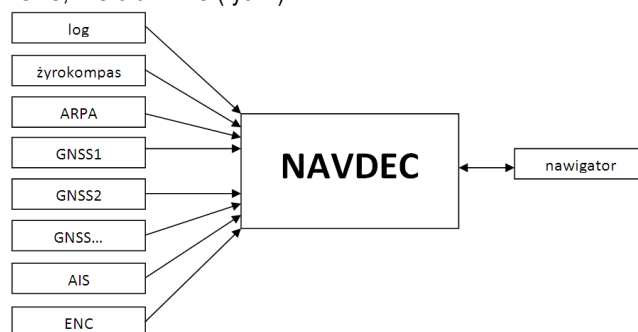
Głównym celem tworzonych systemów wspomaganie decyzji jest eliminowanie lub ograniczenie błędów ludzkich. W przypadku żegluga morskiej przyczyni się to do zapewnienia możliwie wysokiego poziomu bezpieczeństwa nawigacyjnego [11]. Podstawowymi funkcjami tego typu systemów powinny być:

- automatyczne pozyskiwanie i dystrybucja informacji nawigacyjnej,
- analiza sytuacji nawigacyjnej,
- sygnalizowanie sytuacji niebezpiecznych oraz aktualnego poziomu bezpieczeństwa nawigacyjnego na podstawie kryteriów stosowanych przez ekspertów nawigatorów,

- rozwiązywanie sytuacji kolizyjnych, w tym automatyczne wyznaczanie optymalnego manewru lub trajektorii ruchu w sytuacjach kolizyjnych,
- możliwość objaśniania (uzasadnienia) proponowanego manewru,
- interakcja z nawigatorem albo operatorem centrum lądowego.

System powinien także archiwizować dane dla celów późniejszego odtworzenia i analizy procesów ruchu.

Opracowany w Akademii Morskiej w Szczecinie nawigacyjny system wspomaganie decyzji NAVDEC jest narzędziem nawigacyjnym, który realizuje obok funkcji informacyjnych zadania typowe dla systemów wspomaganie decyzji. NAVDEC jest istotnym uzupełnieniem wyposażenia nawigacyjnego statku. Jest systemem czasu rzeczywistego obsługiwanym przez nawigatora. Jego prawidłowe funkcjonowanie wymaga współdziałania z urządzeniami i systemami na statku. Standardowe wyposażenie statku obejmuje: log, żyrokompas, radar, echosondę, ARPA, GNSS (Global Navigational Satellite System), np. GPS (Global Positioning System) lub DGPS (Differential Global Positioning System). Ponadto AIS, ECDIS, GMDSS. W opracowywanej wersji systemu źródłami informacji nawigacyjnej są log, żyrokompas, radar/ARPA, odbiorniki GPS i DGPS, AIS oraz ENC (rys. 1).



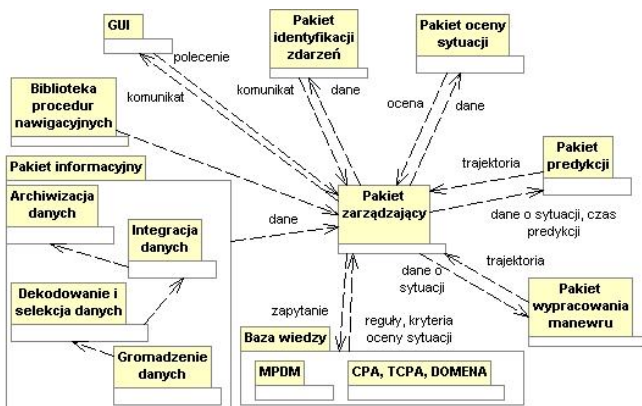
Rys. 1. Otoczenie systemu wspomaganie decyzji na statku morskim

## 2. ARCHITEKTURA SYSTEMU

W architekturze systemu wyróżniono moduły (pakiety): informacyjny (rejestracji dekodowania i interpretacji komunikatów z systemów i urządzeń zewnętrznych), identyfikacji zdarzeń, analizy i oceny sytuacji, wyboru manewru, predykcji ruchu, zarządzający, bazy wiedzy oraz bibliotekę procedur nawigacyjnych.

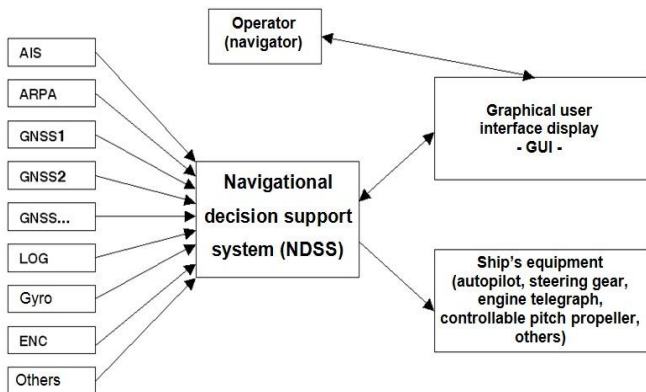
Ze względu na specyfikę systemu (system czasu rzeczywistego) wyodrębniono moduł (pakiet) zarządzający. Dodatkowo wyod-

rzebniono interfejs użytkownika, stanowiący część systemu widoczną dla nawigatora. Za podstawowe funkcje interfejsu uznano: 1) zobrazowanie sytuacji nawigacyjnej z wykorzystaniem ENC; 2) komunikację użytkownik – system; 3) prezentację proponowanych przez system rozwiązań.



**Rys. 2.** Architektura systemu wspomaganie decyzji nawigatora [16]

Opracowywany system jest systemem doradczym. W związku z powyższym przewidziano możliwość oddziaływania na otoczenie w procesie automatycznego sterowania ruchem statku poprzez zmiany nastaw steru i maszyny, np. z wykorzystaniem algorytmu [6], zgodnie z decyzją nawigatora: rozwiązaniem wybranym spośród proponowanych przez system rozwiązań, bądź arbitralnie ustalonym przez operatora (rys. 3).



**Rys. 3.** System wspomaganie decyzji nawigatora w procesie automatycznego sterowania ruchem statku [17]

### 3. WYBRANE FUNKCJE SYSTEMU

Na podstawie przeprowadzonej analizy, do najważniejszych funkcji systemu zaliczono: pozyskiwanie, przetwarzanie i udostępnianie informacji nawigacyjnej, analizę i ocenę sytuacji nawigacyjnej, rozwiązywanie sytuacji kolizyjnych oraz interakcję z nawigatorem [18].

#### 3.1. Pozyskiwanie informacji

Głównymi źródłami danych dla system antykolizyjnego są AIS i GPS. Dodatkowo system może wykorzystywać dane z systemu ARPA, żyrokompasu logu i anemometru. Do odbioru danych zastosowano urządzenie AIS firmy Comar, model SLR-200 (Ship Locator Receiver-200). Nieprzetworzone dane były przesyłane do komputera poprzez port RS-232. Na rysunku 4 przedstawiono fragment zarejestrowanych podczas podróży danych. Linie rozpoczynające się od AI pochodzą z AIS. Przykład rozkodowanych danych przedstawiono na rys.5. Komunikaty rozpoczynające się od GP zawierają

dane GPS i nie są zakodowane (rys. 6). Stosowane w komunikatach skróty oznaczają odpowiednio: MMSI - Maritime Mobile Service Identity, IMO - International Maritime Organization, ETA - Expected Time of Arrival. W zaleceniach ITU-R M.1371-1 znajdują się szczegółowe informacje o danych zawartych w poszczególnych rodzajach komunikatów [8].

```
!AIVDM,1,1,,A,13KQ<L0thdQ1:SINquCVcm:V2<0f,0*06
$GPD TM,W84,,00.0
$GPGGA,052518,5341.1782,N,01430.6123,E,1,10,01.65,000007.2,M,0041.5,M,,*70
$GPD TM,W84,,00.0000,N,00.0000,W,,W84*53
$AIVDM,1,1,,A,14RRj?P0011E?TNmRp00?vN04aT,0*75
$GPGLL,5341.1782,N,01430.6123,E,052518,A,A*43
$GPVTG,236.1,T,233.5,M,000.8,N,0001.4,K,A*1F
$GPGGA,052519,5341.1781,N,01430.6121,E,1,10,01.65,000007.2,M,0041.5,M,,*70
$GPD TM,W84,,00.0000,N,00.0000,W,,W84*53
$GPGLL,5341.1781,N,01430.6121,E,052519,A,A*43
$GPVTG,236.0,T,233.4,M,000.8,N,0001.4,K,A*1F
!AIVDM,2,1,3,A,54R8v402<s35K91;N218UHE:04hr22222222169=956*V0:
TnPnQ@,0*75
!AIVDM,2,2,3,A,jC'8888888888880,2*56
$GPGLL,5341.1779,N,01430.6115,E,052521,A,A*48
```

**Rys.4.** Dane zarejestrowane z odbiornika SLR-200.

```
!AIVDM,1,1,,A,13KQ<L0thdQ1:SINquCVcm:V2<0f,0*06
MMSI: 230182000
Geographic latitude: 54.0114370N
Geographic longitude: 14.2355100E
Speed made good: 4.4 kn
True course: 1650
Course made good: 1710
Angular speed: -70/min
Navigational status: underway using engine.
```

**Rys.5.** Komunikat nr 1 i jego rozkodowana postać (AIS)

```
$GPGGA,052518,5341.1782,N,01430.6123,E,1,10,01.65,000007.2,M,0041.5,M,,*70
GGA Global Positioning System Fix Data
052518 Fix taken at 05:25:18 UTC
5341.1782,N Latitude 53 deg 41.1782'N
01430.6123,E Longitude 014 deg 30.6123'E
1 Fix quality: 1 = GPS fix
10 Number of satellites being tracked
1.65 Horizontal dilution of position
7.2,M Altitude, Meters, above mean sea level
41.5,M Height of geoid (mean sea level) above WGS84 ellipsoid
*70 the checksum data, always begins with *
```

**Rys.6.** Komunikat GPS.

#### 3.2. Integracja i fuzja danych

Procesy integracji i fuzji danych nawigacyjnych rozpatrywano w podziale na obiekty obce i statek własny. W pierwszym przypadku procesy te dotyczą informacji o statkach obcych rejestrowanych za pomocą różnych sensorów. W drugim przypadku odnoszą się one do estymowania wartości wektora stanu statku własnego - w tym pozycji statku własnego - na podstawie informacji pochodzącej z różnych urządzeń, np. dwóch odbiorników GPS.

Powszechnie stosowanym na statkach do identyfikacji parametrów ruchu innych obiektów jest radar z automatycznym śledzeniem echa (ARPA). System ARPA jest systemem autonomicznym, niezależnym od urządzeń i systemów zewnętrznych. Proces śledzenia radarowego polega na estymacji wektora stanu obiektu, którego echo widoczne jest na ekranie radaru. Ze względu na dużą zmienność elementów mających wpływ na ów wektor, niezbędne jest stosowanie filtracji. Opracowano algorytm estymacji wektora stanu obiektu obcego w procesie śledzenia radarowego z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych regresji ogólnej (GRNN) [9].

Alternatywnym źródłem informacji o parametrach ruchu innych obiektów jest instalowany na statkach system automatycznej identyfikacji (AIS), umożliwiający uzyskanie dokładniejszych parametrów ruchu innych obiektów w porównaniu z systemem ARPA[24]. Obowiązek wyposażenia w wymieniony system nie dotyczy jednak mniejszych jednostek (konwencja SOLAS, aneks 17). Oznacza to, że może zaistnieć sytuacja, w której dane z systemu AIS nie będą opisywać wszystkich obiektów obcych (statków) znajdujących się w otoczeniu statku własnego.

W związku z powyższym opracowano algorytm weryfikacji obiektów identyfikowanych w wymienionych wyżej systemach. W przypadku obiektów rejestrowanych w obu systemach dokonywana jest selekcja danych wg kryterium dokładności. Opracowany algorytm zapewnia zwiększenie niezawodności działania systemu jak również zmniejsza błędy pomiarowe.

Do estymacji wektora stanu statku własnego opracowano algorytm, oparty na wielosensorowym filtrze Kalmana, realizujący fuzję danych pozyskiwanych z odbiorników GPS, żyrokompasu i logu statkowego [4,5]. W tym celu rozpatrzono dyskretny system stochastyczny z kilkoma sensorami (czujnikami):

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) &= \Phi \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{y}_i(t) &= \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

- $\mathbf{x}(t) \in R^n$  - wektor stanu,
- $\mathbf{y}_i(t) \in R^{m_i}$  - wektor pomiarów i-tego sensora ( $1 \leq m_i \leq n$ ),
- $\Phi, \mathbf{H}_i$  - stałe macierze o odpowiednich wymiarach,
- $\mathbf{w}(t), \mathbf{v}_i(t)$  - wektory zakłóceń o charakterystyce białych szumów gaussowskich z zerowymi wartościami oczekiwanymi oraz macierzami kowariancji odpowiednio Q i Ri.

Fuzję zbioru danych l sensorów wyraża się średnią ważoną:

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_1(t) \boxtimes \mathbf{x}_1(t) + \mathbf{A}_2(t) \boxtimes \mathbf{x}_2(t) + \dots + \mathbf{A}_l(t) \boxtimes \mathbf{x}_l(t) \quad (2)$$

gdzie:

- $\mathbf{A}_i(t)$  - macierze wag,
- $\tilde{\mathbf{x}}(t)$  - wektor fuzji estymat stanu,
- $\mathbf{x}_i(t)$  - estymaty wektora stanu.

Estymaty wektora stanu  $\mathbf{x}_i(t)$  dla i-tego podsystemu (określonego danym sensorem) uzyskuje się dzięki zastosowaniu filtra Kalmana. Macierze wag wyznacza się ze wzoru:

$$\mathbf{A}_i(t) = \left[ \sum_{j=1}^l \mathbf{P}_{jj}^{-1}(t) \right]^{-1} \cdot \mathbf{P}_{ii}^{-1}(t) \quad (3)$$

gdzie:

- $\mathbf{P}_{ij}(t)$  - macierz krzyżowej kowariancji błędów filtracji pomiędzy i-tym, a j-tym podsystemem systemu określonego równaniem (3.9).

Macierze krzyżowej kowariancji błędów filtracji wyznacza się ze wzoru:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{ij}(t) &= [\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_i(t) \cdot \mathbf{H}_i] \cdot [\Phi \cdot \mathbf{P}_{ij}(t-1) \cdot \Phi^T + \mathbf{Q}] \\ &\quad \cdot [\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_j(t) \cdot \mathbf{H}_j]^T \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

- $\mathbf{I}_n$  - macierz jednostkowa o wymiarach  $n \times n$ ,
- $\mathbf{K}_i(t)$  - macierz wzmocnienia filtra w chwili t.

Zdefiniowany za pomocą równań (1), (2), (3) i (4) wielosensorowy filtr Kalmana minimalizuje ślad macierzy wariancji błędu estymatora fuzji.

Zintegrowane dane stanowią dane wejściowe w procedurach obliczeniowych systemu wspomagania decyzji. Są prezentowane navigatorowi na elektronicznej mapie nawigacyjnej

### 3.3. Analiza i oceny sytuacji

Analiza i ocena sytuacji nawigacyjnej statku własnego stanowi jeden z etapów procesu decyzyjnego. Opracowano algorytmy wnioskowania w zakresie interpretacji przepisów MPDM [12, 19]. Rozpatrzono wynikające z przepisów zasady zachowania się statków wzajemnie się widzących oraz statków w warunkach ograniczonej widzialności. W procesie algorytmizacji uwzględniono fazy spotkania statków oraz stopnie uprzywilejowania, wynikające z przepisów. Na podstawie interpretacji przepisu 17 MPDM wyróżniono następujące fazy spotkania i założono odpowiadające im odległości od statku obcego (D – odległość między statkami):

- faza 1:  $D \geq 8Mm$ ,
- faza 2:  $3Mm \leq D < 8Mm$ ,
- faza 3:  $2Mm \leq D < 3Mm$ ,
- faza 4:  $0,5Mm \leq D < 2Mm$ ,
- faza 5:  $D < 0,5Mm$ .

Wyróżnienie wymienionych wyżej faz wynika z potrzeby określenia sposobu zachowania się statku z uwagi na przepisy prawa drogi. Odgrywa także istotną rolę przy wyborze procedury decyzyjnej oraz weryfikacji wyniku jej działania w nawigacyjnych systemach wspomagania decyzji. Faza 2 występuje, gdy istnieje ryzyko nadmiernego zbliżenia. W fazie tej statek z pierwszeństwem drogi powinien zachować dotychczasowe parametry ruchu. Z kolei statek ustępujący drogi powinien wykonać manewr. Faza 3 występuje, gdy statek, który powinien ustąpić drogi, nie wykonał tego. Statek z pierwszeństwem drogi powinien zwrócić uwagę statkowi ustępującemu drogi, używając odpowiednich dostępnych środków sygnałowych. Statek posiadający pierwszeństwo drogi powinien utrzymywać swoje parametry ruchu. Faza 4 rozpoczyna się wtedy, gdy stanie się oczywiste, że statek, który powinien ustąpić drogi statkowi z pierwszeństwem drogi, nie wykonał manewru antykolizyjnego. W związku z tym statek mający pierwszeństwo drogi może wykonać manewr antykolizyjny. Faza 5 zaczyna się w momencie, gdy działanie tylko jednego statku nie zapobiegnie kolizji. Dla uniknięcia kolizji potrzebne jest skoordynowane działanie obu statków. Jest to faza nadmiernego zbliżenia.

Jako podstawowe kryteria oceny sytuacji nawigacyjnej przyjęto odległość największego zbliżenia CPA (Closest Point of Approach) oraz czas do osiągnięcia tej odległości (TCPA). Są one powszechnie stosowane w radarowych urządzeniach automatycznego śledzenia echa (ARPA).

$$CPA = \frac{X_{wz} VY_{wz} - Y_{wz} VX_{wz}}{V_w} \quad (5)$$

$$TCPA = \frac{X_{wz} VY_{wz} - Y_{wz} VX_{wz}}{V_w^2} \quad (6)$$

gdzie:

- $VX_{wz}, VY_{wz}$  – składowe wektora prędkości względnej,
- $X_{wz}, Y_{wz}$  – odległość między statkami liczona odpowiednio po osi  $x$  i  $y$ ,
- $V_w$  – prędkość względna.

Jako dodatkowe kryterium oceny sytuacji zaproponowano kryterium domeny statku. Domena statku jest obszarem wokół statku, który nawigator chce utrzymać wolny od innych jednostek i obiektów [20, 21].

### 3.4. Wybór drogi

Nawigator, wyznaczając manewr bezpieczny, tj. rozwiązujący sytuację kolizyjną, określa rodzaj manewru (manewr sterem, manewr maszyną) oraz jego parametry: moment rozpoczęcia i wartość/wartości kursu lub prędkości. Może to być np. wyznaczenie kursu bezpiecznego dla którego minięcie obiektu obcego nastąpi w zadanej odległości, uznanej przez nawigatora za bezpieczną (CPA-limit). W stosowanych na statkach systemach ARPA dostępna jest funkcja manewru próbnego (trial), pozwalająca on wyznaczyć odległość minięcia obiektu dla określonych przez nawigatora wartości kursu lub prędkości statku własnego.

Wyznaczenie wartości kursu statku własnego, dla której minięcie obiektu nastąpi w zadanej odległości możliwe jest na podstawie zależności analitycznych [10]:

$$\operatorname{tg} \frac{\phi}{2} = \frac{A_{DCPA} V \pm \sqrt{(A_{DCPA}^2 + 1) V^2 - B_{DCPA}}}{B_{DCPA} - V} \quad (7)$$

$$A_{DCPA} = \frac{X_{wz} Y_{wz} \pm CPA \sqrt{D^2 - CPA^2}}{X_{wz} - CPA^2} \quad (8)$$

$$B_{DCPA} = A_{DCPA} V_x - V_y \quad (9)$$

gdzie:

- $V$  – prędkość statku własnego,
- $X_{wz}, Y_{wz}$  – odległość między statkami liczona po osi  $x$  i  $y$ ,
- $V_x, V_y$  – składowe wektora prędkości statku własnego,
- $D$  – odległość między statkami,
- $\psi$  – nowy kurs, który prowadzi do rozminięcia na zadane CPA.

W podobny sposób wyznaczyć można wartości wektora prędkości statku własnego, dla których minięcie z obiektem obcym nastąpi w zadanej bezpiecznej odległości CPA.

Uwzględniając możliwość spotkania z więcej niż jednym statkiem i potrzebę znalezienia rozwiązania w takiej sytuacji opracowano algorytmy wyznaczania wartości kursów i prędkości bezpiecznych w sytuacji spotkań z wieloma obiektami.

Na tej podstawie możliwe jest także zdefiniowanie trajektorii ruchu statku poprzez wyznaczenie punktów zwrotu: zmiany kursu na kurs bezpieczny i powrotu na kurs pierwotny. Analogicznie, na podstawie wzorów analitycznych, można wyznaczyć bezpieczne prędkości statku własnego.

Problem wyboru drogi, w szczególności w procesie unikania kolizji, można przedstawić jako zadanie optymalizacyjne. Do rozwiązywania tego typu zadań stosuje się metody optymalizacji sta-

tycznej, dynamicznej, jedno- i wielokryterialnej, metody teorii gier, algorytmów genetycznych, logiki rozmytej.

Zadanie to można rozpatrywać jako sterowanie jedno- lub wieloetapowe. W pierwszym przypadku problem sprowadza się do jednokrotnego aktu wyboru, który uwzględni ustalony, przyjęty kryteria wyboru drogi. Przykładowo, może to być wyznaczenie takiej wartości kursu, który umożliwi minięcie obiektów obcych w zadanej bezpiecznej a jednocześnie powoduje możliwie małą stratę drogi lub czasu. Zadanie to można zapisać w postaci:

Zadanie optymalizacji statycznej można zapisać w postaci:

$$F(X^*) = \max\{F(X) : X \subset D\} \quad (10)$$

gdzie:

- $D$  – zbiór dopuszczalnych rozwiązań zadania optymalizacyjnego,
- $X$  – dowolne rozwiązanie,
- $X^*$  – rozwiązanie optymalne,
- $F$  – funkcja celu (kryterium).

W przypadku optymalizacji dynamicznej zadanie polega na znalezieniu takiej funkcji sterującej  $\hat{\mathbf{u}}(t)$ , określającej trajektorię optymalną  $\hat{\mathbf{x}}(t)$ , aby funkcjonal jakości  $J$  przyjmował wartość minimalną:

$$J(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t), t) = \min_{\mathbf{u}(t) \in U_0, \mathbf{x}(t) \in X_0} \int_{t_0}^{t_k} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (11)$$

gdzie:

- $f_0$  – funkcja strat chwilowych,
- $\mathbf{u}(t) \in U_0$  – zbiór sterowań dopuszczalnych,
- $\mathbf{x}(t) \in X_0$  – dopuszczalna przestrzeń trajektorii.

Wskaźnikiem jakości sterowania (kryterium optymalności) może być najmniejsza strata drogi, co przy stałej prędkości statku prowadzi do sterowania czasooptymalnego.

Za kryterium bezpieczeństwa przyjmuje się obszar zagrożenia kolizyjnego. Uwzględnienie ograniczeń nałożonych na zmienne stanu (kryterium bezpieczeństwa, przepisy MPDM) i sterowania jest realizowane poprzez sprawdzenie, czy zmienne stanu nie przekroczyły ograniczeń w każdym rozważanym punkcie oraz odrzuceniu punktów, w których takie przekroczenia wykryto. Uwzględnienie powyższych ograniczeń prowadzi do określenia zbiorów dopuszczalnych sterowań ( $U_0$ ) oraz dopuszczalnych stanów (dopuszczalna przestrzeń trajektorii  $X_0$ ).

Przykładowo, w zadaniu minimalizacji drogi wskaźnik jakości (11) przyjmie postać:

$$J(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t), t) = \min_{\mathbf{u}(t) \in U_0, \mathbf{x}(t) \in X_0} \sum_{i=0}^{k-1} d(i, i+1) \quad (12)$$

gdzie:

- $\mathbf{u}(t) \in U_0$  – zbiór sterowań dopuszczalnych,
- $\mathbf{x}(t) \in X_0$  – dopuszczalna przestrzeń trajektorii,
- $d(i, i+1)$  – przebyta droga przy przejściu ze stanu  $x_i$  do stanu  $x_{i+1}$ ,

$\hat{\mathbf{x}}(t)$  – trajektoria optymalna,

$\hat{\mathbf{u}}(t)$  – strategia sterowania, określająca trajektorię optymalną.

Strategię sterowania, określającą trajektorię optymalną stanowi ciąg sterowań:

$$\hat{u} = (\hat{u}_{t_0}, \hat{u}_{t_1}, \dots, \hat{u}_{t_{k-1}}) \quad (13)$$

Odpowiednio, za punkt początkowy przyjmuje się aktualną pozycję statku opisaną wektorem stanu statku, a za punkt końcowy:

- ustalony punkt końcowy trajektorii (sterowanie z ustalonym punktem końcowym), głównie na akwenach ograniczonych,
- ustalony kurs końcowy odpowiadający standardowo kursowi pierwotnemu, głównie na akwenach otwartych.

Powyższe zadanie rozwiązać można różnymi metodami. Problem wyznaczania trajektorii optymalnej statku może być efektywnie rozwiązany z zastosowaniem teorii grafów. Wykorzystuje się tu właściwości grafu skierowanego, w którym krawędzie są zorientowane i strzałki wskazują kierunek ruchu lub kolejność wyboru. Jednym z najbardziej efektywnych algorytmów, które zostały zaproponowane dla wyznaczania najkrótszej ścieżki między określoną parą wierzchołków jest algorytm Dijkstry.

Tak sformułowane zadania optymalizacyjne można opisać za pomocą procedur decyzyjnych dla kryteriów bezpieczeństwa: największego zbliżenia oraz domeny statku.

Zadanie to może dotyczyć wyznaczenia optymalnej trajektorii poprzez określenie punktów zwrotu i kątów kursowych na wyznaczonych tymi punktami odcinkach bądź nastaw steru lub/i napędu w wybranych momentach czasowych.

## 4. TESTOWANIE I WERYFIKACJA SYSTEMU

### 4.1. Badania symulacyjne

Do tej pory NAVDEC był testowany na symulatorach stanowiących wyposażenie Akademii Morskiej w Szczecinie:

- ECDIS NaviSailor 4000 (Transas),
- Full mission bridge simulator Polaris (Kongsberg),

Celem testowania systemu NAVDEC było m.in.:

- sprawdzenie poprawności obliczania parametrów spotkania (CPA, TCPA) [3],
- sprawdzenie poprawności obliczania bezpiecznych kursów, które umożliwiają rozminięcie z innymi obiektami na zadane CPA [3,23].

Badania polegały na porównaniu wyników obliczeń wartości parametrów spotkań statków w czasie symulacji. Wyniki otrzymane z wykorzystaniem symulatora ECDIS potwierdziły poprawność obliczeń realizowanych przez system NAVDEC. W celu weryfikacji poprawności obliczeń parametrów spotkania CPA i TCPA wykonanych przez NAVDEC, podobne badania przeprowadzono na certyfikowanym symulatorze manewrowym (Full Mission Simulator) Polaris firmy Kongsberg.

Testowanie systemu NAVDEC na Symulatorze przeprowadzono na akwenu wolnym od niebezpieczeństw nawigacyjnych w czterech różnych scenariuszach:

1. jeden obiekt na kursie wprost i dwa na kursach przecinających,
2. jeden obiekt wyprzedzany, jeden na kursie wprost, a ostatni na kursie przecinającym,
3. jeden obiekt wyprzedzający i dwa na kursach przecinających,
4. wszystkie obiekty na kursie wprost.

W pierwszych trzech symulacjach uczestniczyły 3 obiekty obce i statek własny. W ostatniej 40 statków obcych i statek własny. Celem ostatniej symulacji było, oprócz sprawdzenia poprawności obliczenia parametrów spotkania, sprawdzenie, czy system spełnia kryteria ilości śledzonych obiektów jakie stawiane są systemowi ARPA.

Zarejestrowano 9261 pomiarów. Wartości CPA obliczone przez NAVDEC były średnio o 36 metrów mniejsze od tego otrzymanego z symulatora. Przyczyną tego stanu rzeczy jest fakt, że NAVDEC uwzględnia rozmiary statków i ich wzajemne położenie przy obliczaniu parametrów spotkania. Z punktu widzenia bezpieczeństwa żeglugi jest to duża zaleta systemu NAVDEC. W przypadku spotkania statków o długości ponad 300 metrów, CPA otrzymane z ARPY może być o ponad 370 metrów (ponad 2 kable) większe niż faktyczna odległość minięcia, ponieważ radar zazwyczaj mierzy odległość między nadbudówkami statków, które są obiektami najbardziej charakterystycznymi.

Największa różnica pomiędzy CPA otrzymanym z systemu NAVDEC i Symulatora wyniosła 370 m (0.2 Mm). Taki przypadek wystąpił siedmiokrotnie. Największa różnica pomiędzy TCPA zarejestrowanym na Symulatorze, a obliczonym przez NAVDEC wyniosła 540 s (9 minut). Wszystkie przypadki, kiedy różnica pomiędzy TCPA była większa niż 300 s (5 minut) pojawiły się, gdy TCPA było większe niż 6000 s (100 minut). W takiej sytuacji trudno mówić o ryzyku zderzenia. Co więcej, większość urządzeń nawigacyjnych nie wyświetla tak dużego TCPA. W takiej sytuacji zazwyczaj wyświetlany jest komunikat "TCPA>99 min". W ponad 99% przypadków różnica pomiędzy TCPA zarejestrowanym z Symulatora, a tym obliczonym przez NAVDEC była mniejsza niż 60 s (1 minuta).

### 4.2. Badania w warunkach rzeczywistych

pozytywne wyniki badań symulacyjnych systemu NAVDEC pozwoliły na ich kontynuowanie w warunkach rzeczywistych. Testy systemu w warunkach rzeczywistych prowadzone były na następujących statkach:

- Nawigator XXI – statek szkolno-badawczy, Akademia Morska w Szczecinie,
- Hammonia Berolina – kontenerowiec,
- Dar Młodzieży – żaglowiec szkolny, Akademia Morska w Gdyni.

Analogicznie jak w przypadku badań symulacyjnych, celem testowania systemu NAVDEC było sprawdzenie poprawności obliczania parametrów spotkania (CPA, TCPA) i poprawności obliczania bezpiecznych kursów, które umożliwiają rozminięcie z innymi obiektami na zadane CPA.

Szczególnie cenne były wyniki badań przeprowadzone na kontenerowcu Hammonia Berolina w typowych warunkach eksploatacyjnych, w okresie czterech miesięcy. Potwierdzono prawidłowość obliczeń parametrów spotkań statków. Dużo uwagi poświęcono wyznaczaniu nowych, bezpiecznych kursów, które spełniają kryteria bezpieczeństwa, założone przez nawigatora. Zastosowanie kursów zalecanych przez NAVDEC umożliwiło bezpieczne rozminięcie z innymi obiektami. Zamieszczony poniżej przykład dotyczy spotkania ze statkiem FR8 Fortitude (rys. 8).

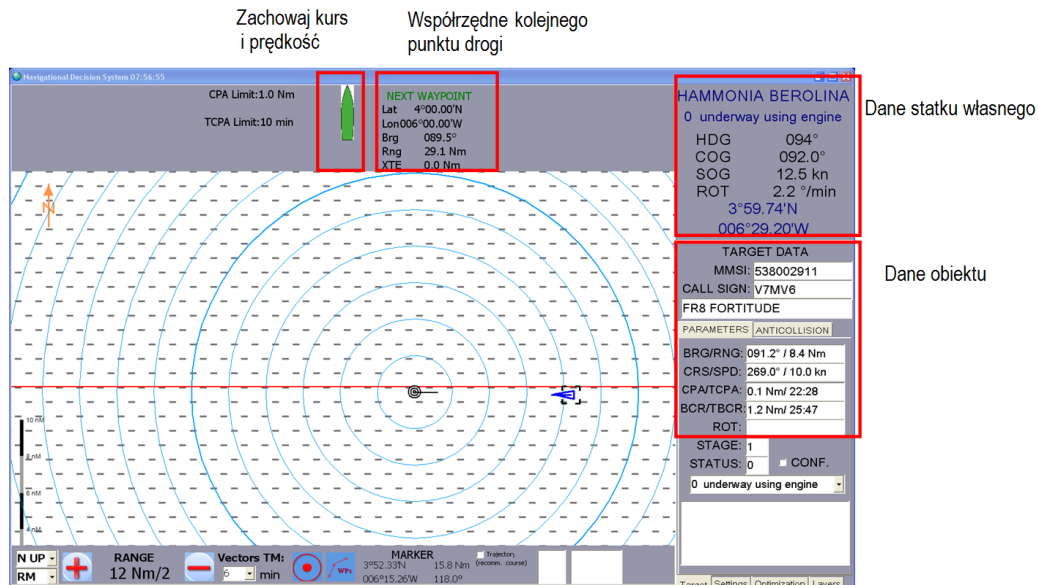
Na rysunkach rys. 7-9 przedstawiono zrzuty ekranu interfejsu użytkownika opracowanego systemu wspomaganego decyzji. Do sytuacji kolizyjnej doszło 8 sierpnia 2012 na Zatoce Gwinejskiej. Statek na kursie kolizyjnym to FR8 Fortitude. W momencie, gdy statki były od siebie w odległości ponad 8 Mm (rys.7.), system zakwalifikował sytuację jako bezpieczną, co zostało zakomunikowane zielonym symbolem statku u góry ekranu. Symbol ten oznacza, że system sugeruje zachowanie swojego kursu i prędkości. Odległość

8 Mm może zostać zmieniona przez użytkownika np. na akwenach ograniczonych. Podobnie jest z odległościami przy kolejnych fazach sytuacji spotkania wynikających z przepisów MPDM.

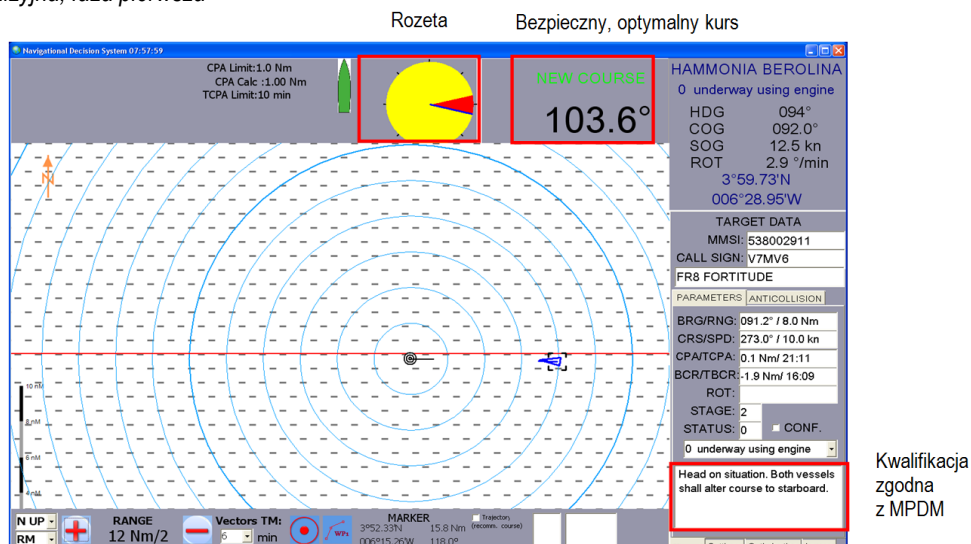
Po wykonaniu przez statek własny zalecanego przez NAVDEC

zmiany kursu, rozeta zniknęła ponieważ CPA wynosi 1.0 Mm, co spełnia kryteria bezpieczeństwa przyjęte przez nawigatora (rys.9).

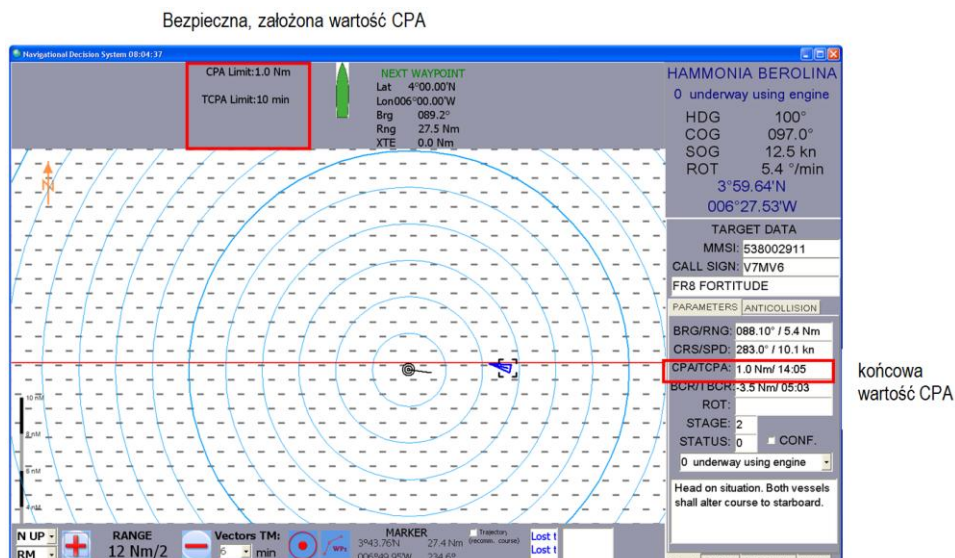
Kiedy odległość między statkami była mniejsza niż założone 8 Mm, system zakwalifikował sytuację spotkania zgodnie z MPDM



Rys.7. Sytuacja kolizyjna, faza pierwsza



Rys.8. Sytuacja kolizyjna, faza druga



Rys.9. Sytuacja kolizyjna, faza trzecia.

[13,22]. W tym przypadku mamy do czynienia z sytuacją Wprost lub prawie wprost (Head on situation), a więc, zgodnie z MPDM, obydwa statki powinny zmienić swój kurs w prawo, aby uniknąć kolizji (rys.8). Ponadto, na górze ekranu, została wyświetlona rozeta przedstawiająca zakresy kursów bezpiecznych i niebezpiecznych. Czerwony kolor to sektory kursów niebezpiecznych tzn. takich, które mogą prowadzić do kolizji i nie spełniają założonego kryterium odległości rozminięcia. Kursy z żółtego zakresu gwarantują, przy zachowaniu parametrów ruchu innych obiektów, rozminięcie na co najmniej założone CPA (1 Mm). Dodatkowo, na niebiesko zaznaczony jest kurs optymalny, które spełnia kryteria odległości minięcia, jest zgodny z MPDM oraz umożliwia dotarcie najkrótszą trasą do następnego punktu drogi. Kurs ten, w postaci alfanumerycznej, jest również wyświetlany obok rozety (rys. 8). Odległość minięcia CPA była dodatkowo przez cały czas weryfikowana przez wykorzystaniem radaru stanowiącego standardowe wyposażenie mostka nawigacyjnego. W momencie, gdy TCPA było równe zero (po wykonaniu manewru zgodnie z zaleceniami systemu), CPA wynosiło 1 Mm.

W żadnym z zarejestrowanych w omawianym przedziale czasu 4 miesięcy przypadków, w tym także w czasie spotkania z FR8 Fortitude, różnica między wskazaniami wartości CPA w chwili minięcia wyznaczonymi w systemie NAVDEC i wskazaniami radaru nie była większa niż 0.1 Mm.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiony w artykule nawigacyjny system wspomagania decyzji na statku morskim NAVDEC realizuje obok podstawowych funkcji informacyjnych zadania typowe dla systemów wspomagania decyzji. Omówiono podstawowe moduły systemu oraz przedstawiono wybrane algorytmy zaimplementowane w wymienionych modułach. System testowano zarówno w warunkach laboratoryjnych (symulatory Akademii Morskiej w Szczecinie) jak i rzeczywistych - na statku morskim (statki szkolne, statek handlowy). Działanie systemu w sytuacjach spotkań statków w celu unikania kolizji przedstawiono na wybranych przykładach zarejestrowanych w czasie badań symulacyjnych i rzeczywistych.

Rezultaty testowania potwierdzają, że system jest pomocny i skuteczny przy rozwiązywaniu sytuacji kolizyjnych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Banachowicz A., Wolejsza P., The analysis of possibilities how the collision between m/v Gdynia and m/v Fu Shan Hai could have been avoided, *Advances in marine navigation and safety of sea transportation*, 2007.
2. Banachowicz A., Wolejsza P., Calculation accuracy of safe course made good in an anticollision system, *V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna EXPLO-SHIP, Kołobrzeg 2008*.
3. Banachowicz A., Wolejsza P., Assessment of accuracy of encounter parameters (CPA and TCPA) calculation in multiagent navigation decision support system, *XXII Conference "Geodetic technologies in engineering surveying and navigation"*, Kraków 2008.
4. Bar-Shalom Y., Willett P., Tian X. „Tracking and data fusion.” YBS Publishing, Storrs 2011.
5. Borkowski P., Data fusion in a navigational decision support system on a sea-going vessel. *Polish Maritime Research vol. 19, no. 4(76), 2012 (78-85)*
6. Borkowski P., Zwierzewicz Z., Ship course-keeping algorithm based on knowledge base. *Intelligent Automation and Soft Computing vol. 17, no. 2, 2011 (149-163)*
7. Gralak R., Juskiewicz W., Analysis of vessels collision m/v Ziemia Łódzka and m/v Vertigo with Fullmission Bridge Simulator”, *Proceedings of the 8th International Probabilistic Workshop, Szczecin, 2010*.
8. IALA technical clarification on recommendation ITU-R M.1371-1. [www.iala-aism.org](http://www.iala-aism.org)
9. Kazimierski W., Determining of marine radar target movement models for the needs of multiple model neural tracking filter, *Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. International Radar Symposium IRS 2011, Leipzig, Germany 2011, s.611-616*.
10. Lenart A., Manoeuvring to required approach parameters – CPA distance and time. *Annual of Navigation 1/1999*.
11. Łazarowska A.: Decision support system for collision avoidance at sea. *Polish Maritime Research, Vol. 19, No 74S, 2012, p.19-24*.
12. Magaj J., Wolejsza P., Verifying the decision-support navigational system in real condition, *Sejmik Młodych Informatyków, Świnoujście 2008*.
13. Magaj J., Wolejsza P., Algorithm of working out anticollision manoeuvre by decision-supporting system, *Advanced Computer Systems (ACS 2008), Międzyzdroje 2008*.
14. Magaj J., Wolejsza P., Using AIS information for anticollision manoeuvre exemplified by the collision between m/v Ziemia Łódzka and m/v Vertigo, *Polish Journal of Environmental Studies Vol.16, No. 6B, 2007*.
15. Magaj J., Wolejsza P., Analysis of possible avoidance of the collision between m/v Gotland Carolina and m/v Conti Harmony, *Annual of Navigation No 16, pp 165-172, Gdynia 2010*.
16. Pietrzykowski Z., Magaj J., Chomski J., A navigational decision support system for sea-going ships, *Measurement Automation Monitoring (Pomiary Automatyka Kontrola), vol. 55, 10/2009, str. 860-863*
17. Pietrzykowski Z., Borkowski P., Wolejsza P., NAVDEC – navigational decision support system on a sea-going vessel, *Scientific Journals Maritime University no 30 (102), pp. 102-108, Szczecin 2012*.
18. Pietrzykowski Z., Borkowski P., Wolejsza P., Maritime Intelligent Transport Systems, *Communication in Computer and Information Sciences, Telematics in the Transport Environment, Springer Verlag Berlin Heidelberg, pp. 284-292, 2012*.
19. Pietrzykowski Z., Borkowski P., Wolejsza P., Uriasz J., Marine navigational decision support system, *International symposium Information on Ships ISIS, Hamburg, 2012, CD, ISSN 2191-8392*.
20. Pietrzykowski Z., Magaj J., Wolejsza P., Chomski J., Fuzzy logic in the navigational decision support process onboard a sea-going vessel, *Lecture Notes in Computer Science, Volume 6113 / 2010: Artificial Intelligence and Soft Computing - ICAISC 2010, Eds. L Rutkowski, R.Scherer, R. Tadeusiewicz, L.A. Zadeh, Springer-Verlag Heidelberg, Part I, pp. 185 – 193*.
21. Pietrzykowski Z., Uriasz J. „The ship domain – a criterion of navigational safety assessment in an open sea area.” *The Journal of Navigation (2009), 62, The Royal Institute of Navigation, Cambridge, (93-108)*.
22. Pietrzykowski Z. „Ship’s fuzzy domain – a criterion for navigational safety in narrow fairways.” *The Journal of Navigation, 61, The Royal Institute of Navigation, Cambridge, 2008r., pp. 501-514*.
23. Wolejsza P., Magaj J., Determination of the right-of-way of sailing ships for use in a navigational decision support system, *Scientific Journals Maritime University no 30 (102), pp. 170-173, Szczecin 2012*.

24. Wolejsza P., Statistical analysis of real radar target course and speed changes for the needs of multiple model tracking filter, Scientific Journals Maritime University no 30 (102), pp. 166-169, Szczecin 2012.

## NAVIGATIONAL DECISION SUPPORT SYSTEM IN COLLISION AVOIDANCE AT SEA

### *Abstract*

*This article presents the NAVDEC - navigational decision support system on a sea going ship. Beside basic information functions the system carries out tasks typical of decision support systems. The main modules of the system include acquisition and integration of data from navigation devices and systems, analysis and assessment of navigational situations and the determination of ship manoeuvre to be performed. Some of the algorithms implemented in these modules are presented. The system was tested in both laboratory and real conditions on board a vessel. The use of the system in ship encounter situations was discussed using actual scenarios registered during simulation tests and in a real voyage of a sea-going vessel.*

Autorzy:

**Zbigniew PIETRZYKOWSKI** – Akademia Morska w Szczecinie,  
Wydział Nawigacyjny

**Piotr WOŁEJSZA** – Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny