

## METODY SYNTEZY ALGORYTMÓW BEZPIECZNEGO STEROWANIA STATKIEM

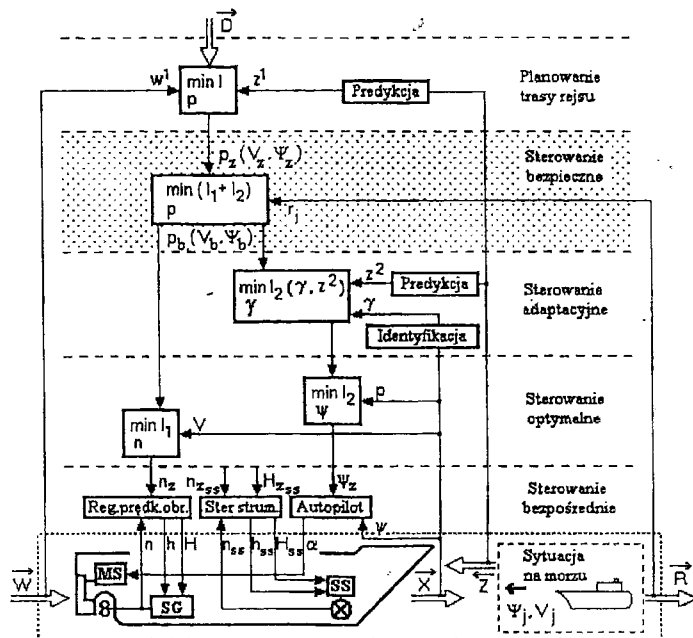
*W referacie opisano zastosowanie wybranych metod teorii sterowania, sztucznej inteligencji i gier dynamicznych do obliczania bezpiecznej trajektorii optymalnej własnego statku w sytuacji mijania się z większą ilością ruchomych obiektów, w oparciu o informację z systemu antykolizyjnego ARPA. Przedstawiono dwa algorytmy sterowania: wielokrokowej gry macierzowej z ryzykiem kolizji i programowania dynamicznego z neuronowymi ograniczeniami stanu procesu. Rozważania zilustrowano przykładami komputerowej symulacji poszczególnych programów wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku w rzeczywistej sytuacji na morzu zarejestrowanej na ekranie radaru.*

### METHODS OF SYNTHESIS SAFE SHIP CONTROL ALGORITHMS

*The paper describes the application of selected methods of a control theory, artificial intelligence and dynamic games to the determination of safe and optimal ship trajectory in situation of passing a big number of moving objects, on the base information from anti-collision system ARPA. Two control algorithms are introduced: multi-step matrix game with the risk of collision and dynamic programming with neural constraints of state process. The consideration have been illustrated an examples of a computer simulation of particulars programmes of determination of safe ship trajectory in real situation recorded on the radar screen.*

#### I. STRUKTURA SYSTEMU STEROWANIA

Sterowanie ruchem statku można potraktować jako wielowarstwowy problem sterowania, co wynika z podziału całego systemu kierowania statkiem w ramach zadań przewozowych armatora na pewne podsystemy, którym przyporządkowuje się odpowiednie warstwy sterowania. Na rysunku 1 przedstawiającym strukturę systemu wprowadzono następujące oznaczenia: MS - maszyna sterowa, SG - silnik główny, SS - ster strumieniowy,  $\bar{D}$  - decyzje żelugowe armatora,  $\bar{W}$  - koszty prowadzenia statku,  $\bar{X}$  - stan procesu sterowania,  $\bar{Z}$  - zakłócenia,  $\bar{R}$  - zadania przewozowe armatora. Integralną część całego systemu stanowi proces kinematyki i dynamiki ruchu statku jako obiektu sterowania w różnych warunkach eksploatacyjnych, takich jak: stabilizacja kursu lub trajektorii, regulacja prędkości statku, sterowanie sterem strumieniowym, kompensacja kotłusań bocznych, bezpieczne wymijanie spotkanych obiektów, stabilizacja położenia statku ratowniczego, wiertniczego lub zbiornikowca, itp. Pierwszą warstwę sterowania bezpośredniego reprezentują układy stabilizacji prędkości obrotowej śruby napędowej i kursu statku za pomocą regulatora Woodworda, steru strumieniowego i autopilota z maszyną sterową.



Rys. 1. Wielowarstwowy system sterowania ruchem statku

Kolejne warstwy to sterowanie optymalne i adaptacyjne wzdłuż zadanej trajektorii. Czwartą warstwę sterowania stanowi proces bezpiecznego mijania spotkanych obiektów w oparciu o informację z systemu antykolidyjnego ARPA, która jest przedmiotem rozważań w niniejszym artykule. Najwyższa warstwa dotyczy optymalizacji drogi statku z uwzględnieniem jego charakterystyki prędkościowej oraz warunków hydrometeorologicznych.

## 2. ZADANIE STEROWANIA

Zakres funkcji standardowego systemu antykolidyjnego ARPA, umożliwiającego automatyczne śledzenie  $j$  obiektów, wyznaczanie ich prędkości  $V_j$  i kursu  $\psi_j$  oraz elementów zbliżenia w postaci najmniejszej odległości zbliżenia  $D_{\min}^j = DCPA_j$  (Distance of the Closest Point of Approach) i czasu pozostającego do jej osiągnięcia  $T_{\min}^j = TCPA_j$  (Time to the Closest Point of Approach), kończy się na symulacji wybranego przez nawigatora manewru zmiany kursu  $\Delta\psi$  lub prędkości  $\Delta V$  własnego statku w celu zachowania bezpiecznej odległości mijania  $D_b$ . Problem wyboru tego manewru jest bardzo trudny ze względu na dużą złożoność procesu sterowania.

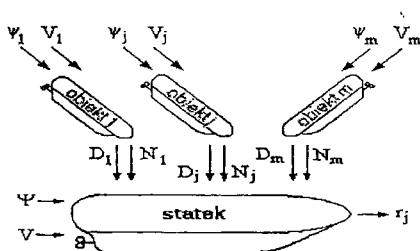
Sposób sterowania statkiem, będącym wielowymiarowym i nieliniowym obiektem dynamicznym, zależy od zakresu i dokładności informacji o aktualnej sytuacji nawigacyjnej oraz od przyjętego modelu procesu. Przy jego opracowywaniu istotne jest uwzględnienie: kinematyki i dynamiki własnego statku, zakłóceń, ograniczeń nawigacyjnych, strategii spotkanych obiektów, zaleceń prawa drogi morskiej, subiektywności nawigatora w podejmowaniu decyzji manewrowej oraz funkcji celu sterowania. Różnorodność możliwych do przyjęcia modeli wpływa bezpośrednio na syntezę algorytmów sterowania, a następnie na efekty bezpiecznego kierowania ruchem własnego statku.

### 3. ALGORYTMY STEROWANIA

Proces sterowania statkiem w sytuacjach kolizyjnych przy spotkaniu z większą ilością obiektów, przy nie ścisłym współdziałaniu obiektów w myśl zaleceń przepisów międzynarodowego prawa drogi morskiej COLREG (International Regulations for Preventing Collisions at Sea), często zachodzi w warunkach nieokreśloności i konfliktu. Dlatego za najbardziej adekwatny model procesu przyjmuje się model gry różniczkowej, a w szczególności model gry pozycyjnej – ogólnie  $j$  śledzonych statków jako obiektów sterowania. Uwzględniając dużą złożoność modelu gry różniczkowej, do praktycznej syntezy algorytmów sterowania formułuje się uproszczone modele gry macierzowej i dynamiczny, z jednoczesnym zastosowaniem wybranych metod sztucznej inteligencji. Poszczególnym modelom procesu można przyporządkować odpowiednie algorytmy bezpiecznego sterowania statkiem w sytuacjach kolizyjnych [2,3,10,11].

#### 3.1. Algorytm wyznaczania trajektorii rozgrywanej

Pomijając równania dynamiki okrętu model gry różniczkowej procesu zapobiegania kolizjom sprowadza się do gry macierzowej  $j$  uczestników niekooperujących ze sobą (rys. 2).



Rys. 2. Schemat blokowy modelu gry procesu sterowania statkiem

Macierz gry  $R[r_j(v_0, v_j)]$  zawiera wartości ryzyka kolizji  $r_j$  wyznaczone w oparciu o dane z systemu antykolizyjnego ARPA dla dopuszczalnych strategii  $v_0$  własnego statku i dopuszczalnych strategii  $v_j$  poszczególnych  $j$  spotkanych obiektów. Ilość kolumn macierzy odpowiada liczbie strategii gracza A (własny statek) – zmianom kursu  $0^\circ, \pm \Delta\psi, \pm 2\Delta\psi$ , itd. oraz zmianom prędkości  $0, -\Delta V, -2\Delta V$ , itd. Ilość wierszy macierzy stanowi sumę strategii gracza B (wszystkich  $j$  spotkanych obiektów), analogicznie z uwzględnieniem wszystkich zmian kursu i prędkości każdego obiektu [5,8,9]. Ryzyko kolizji definiuje się jako odniesienie aktualnej sytuacji zbliżenia, opisananej przez parametry  $D_{\min}^j$  i  $T_{\min}^j$ , do założonej oceny sytuacji jako bezpiecznej, określonej przez bezpieczną odległość zbliżenia  $D_b$  i czas bezpieczny  $T_b$  – niezbędne do wykonania manewru uniknięcia zderzenia, z uwzględnieniem aktualnej odległości  $D_j$  własnego statku do  $j$  spotkanego obiektu:

$$r_j = \left[ a_1 \left( \frac{D_{\min}^j}{D_b} \right)^2 + a_2 \left( \frac{T_{\min}^j}{T_b} \right)^2 + a_3 \left( \frac{D_j}{D_b} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Współczynniki wagi  $a_1, a_2$  i  $a_3$  zależą od stanu widzialności na morzu, dynamicznej długości i dynamicznej szerokości statku oraz rodzaju akwenu.

W grze macierzowej gracz A ma możliwość użycia  $v_0$  różnych strategii czystych, a gracz B ma  $v_j$  różnych strategii czystych. Ograniczenia na wybór strategii wynikają z zaleceń prawa drogi morskiej COLREG. Ponieważ najczęściej gra nie ma punktu siodłowego, więc nie ma zagwarantowanego stanu równowagi – brak jest w grze strategii czystych dla obu graczy. W celu rozwiązania tego problemu można posłużyć się dualnym programowaniem liniowym. W zagadnieniu dualnym gracz A dąży do minimalizacji ryzyka kolizji, natomiast gracz B dąży do maksymalizacji ryzyka kolizji. Składowe strategii mieszanej wyrażają rozkład prawdopodobieństwa użycia przez graczy ich strategii czystych. W rezultacie dla kryterium sterowania w postaci:

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_0 \end{pmatrix}^* = \min_{v_0} \max_{v_j} r_j \quad (2)$$

otrzymuje się macierz prawdopodobieństwa  $P [p_j(v_j, v_0)]$  użycia poszczególnych strategii czystych. Rozwiązaniem zadania sterowania jest strategia o największym prawdopodobieństwie, która będzie zarazem optymalną wartością zbliżoną do strategii czystej:

$$\begin{pmatrix} u_0^{v_0} \end{pmatrix}^* = u_0^{v_0} \left\{ p_j(v_j, v_0) \right\}_{\max} \quad (3)$$

Wykorzystując funkcję *lp – linear programming* z Optimization Toolbox oprogramowania Matlab opracowano algorytm RGM wyznaczania bezpiecznej trajektorii rozgrywającej statku w sytuacji kolizyjnej.

### 3.2. Algorytm wyznaczania trajektorii dynamicznej

Do opisu procesu w postaci równań stanu zakłada się ruch prostoliniowy i jednostajny spotkanych obiektów, uwzględniając jednocześnie własności dynamiczne własnego statku [4,6,7]. Występujące ograniczenia stanu i sterowania wynikają z konieczności uwzględnienia fizycznych ograniczeń wielkości charakteryzujących proces, zapewnienia bezpiecznej żeglugi z jednoczesnym uwzględnieniem zaleceń przepisów prawa drogi morskiej i uwzględnienia rzeczywistych ograniczeń nawigacyjnych. Podstawowym kryterium sterowania jest zapewnienie bezpiecznego mijania się obiektów, które uwzględnione jest w ograniczeniach stanu:

$$G_j(\psi_j, V_j) \leq 0 \quad (4)$$

Zależność (4) określa obszar zagrożenia kolizyjnego tzw. domenę statku (z ang. *ship's domain* [1]), przyjmując postać koła, paraboli, elipsy, sześciokąta, itp. Domeny okrętów mogą mieć stały kształt lub zmienny generowany przez sztuczną sieć neuronową Neural Network Toolbox oprogramowania Matlab. Dodatkowo uwzględnia się kryterium optymalności w postaci najmniejszych strat drogi na bezpieczne wymijanie obiektów, które przy stałej prędkości statku prowadzi do sterowania czasoptymalnego. Optymalny czas przepłynięcia przez własny statek  $k$  etapów według zasady optymalności Bellmana wyniesie:

$$t_k^* = \min_{\alpha_{k-2}, \beta_{k-2}} (t_{k-1}^* + \Delta t_k) \quad k = 3, 4, \dots, K \quad (5)$$

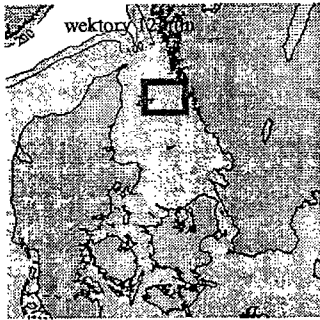
Wzór (5) określa równanie funkcyjne Bellmana dla procesu sterowania statkiem poprzez zmianę kąta wychylenia steru  $\alpha$  i prędkości obrotowej śruby  $n$ .

# BADANIA SYMULACYJNE ALGORYTMÓW

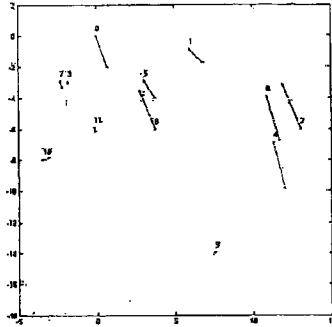
Wykorzystując oprogramowanie Matlab/Simulink przeprowadzono badania symulacyjne algorytmów:

- RGM 1 dla  $v_0=2$  ( $0^\circ, 60^\circ$ ) i  $v_3=3$  ( $-30^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ ),
- RGM 2 dla  $v_0=4$  ( $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ ) i  $v_3=3$  ( $-30^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ ),
- RGM 3 dla  $v_0=13$  (od  $0^\circ$  do  $60^\circ$  co  $5^\circ$ ) i  $v_3=25$  (od  $-60^\circ$  do  $60^\circ$  co  $5^\circ$ ),
- PROGNEURAL,

wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku, w warunkach dobrej ( $D_b=0.5$  Mm) i złej widzialności na morzu ( $D_b=1.5$  Mm), na przykładzie rzeczywistej sytuacji nawigacyjnej, zarejestrowanej na ekranie radaru statku badawczo-szkoleniowego *HORYZONT II*, podczas mijania się z jedenastoma spotkanymi obiektami w Cieśninie Kattegat (rys. 3).

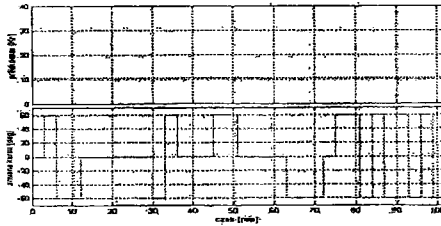
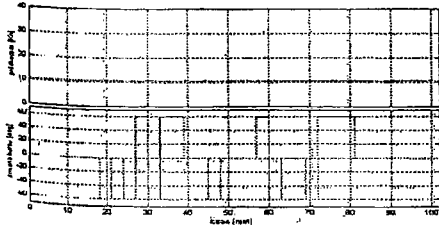
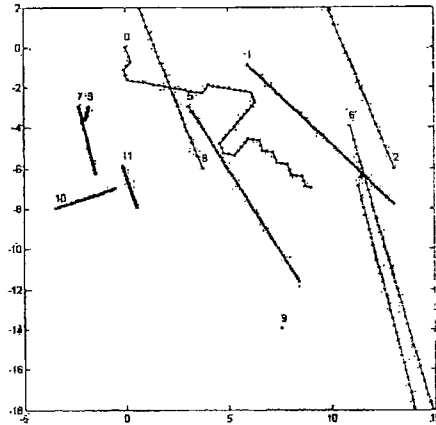
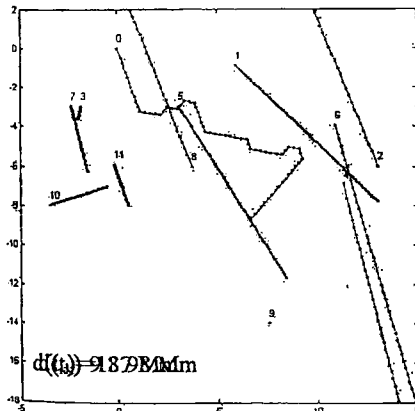


$D_b=0.5$  Mm

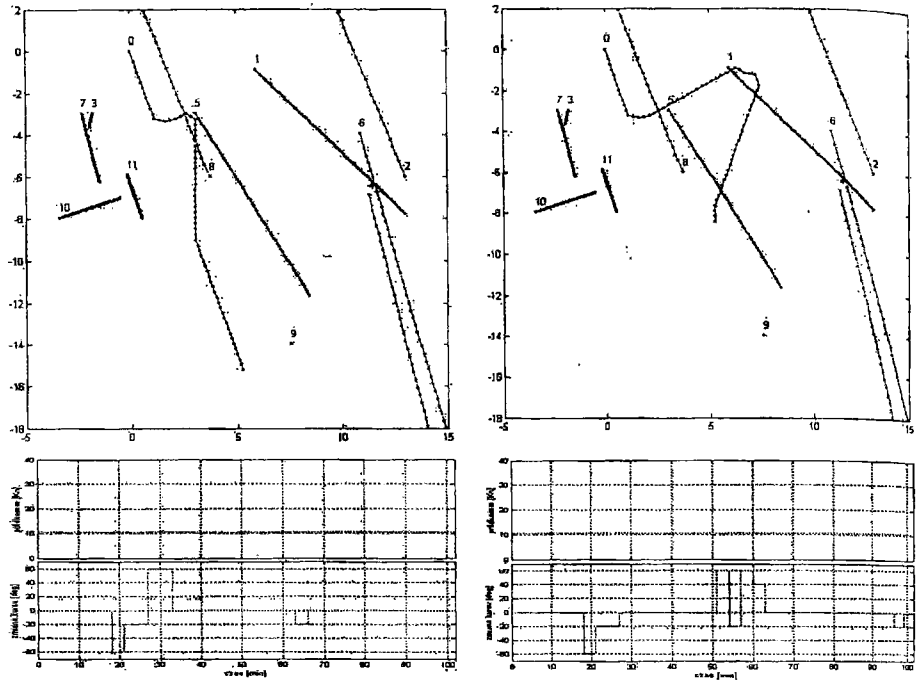


$D_b=1.5$  Mm

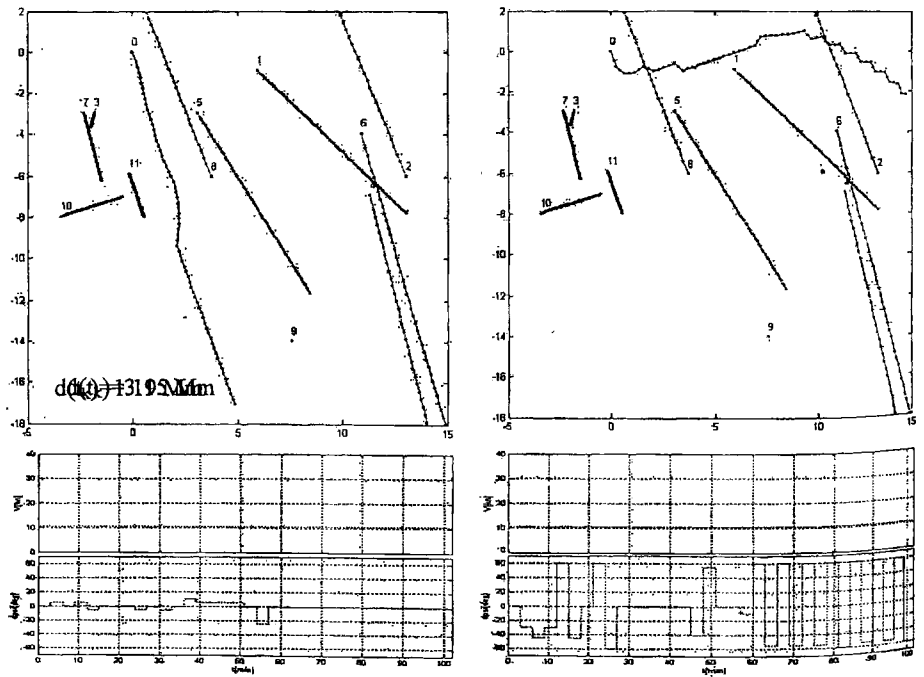
## RGM 1

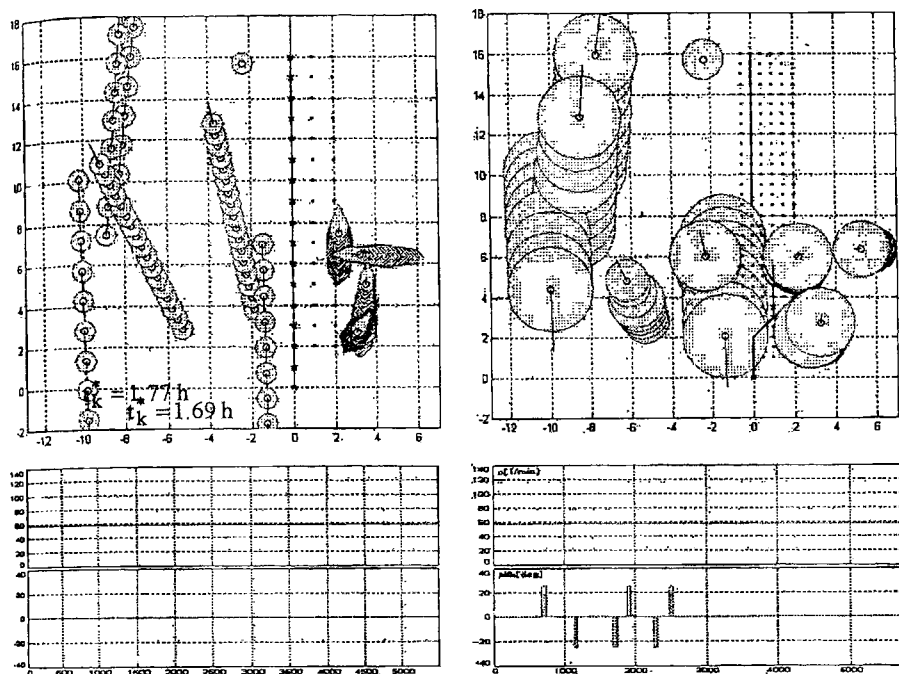


RGM 2



RGM 3





Rys. 3. Wyniki symulacji komputerowej bezpiecznych trajektorii rozgrywających oraz dynamicznych z neuronowymi ograniczeniami stanu procesu

#### 4. WNIOSKI

Zastosowanie modelu wielokrokowej gry macierzowej do syntezy optymalnego sterowania umożliwia wyznaczenie bezpiecznej rozgrywającej trajektorii własnego statku w sytuacjach mijania się z większą ilością spotkanych obiektów jako pewnej sekwencji manewrów kursem i prędkością. Opracowany program RGM realizuje reguły prawa drogi morskiej, czas wyprzedzenia manewru uwzględniający własności dynamiczne statku oraz ocenia odchylenie końcowe trajektorii rzeczywistej od jej wartości zadanej.

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że program potrafi wyznaczyć trajektorie rozgrywającą, gdy nie znajduje się w sytuacji zbliżeniowej ze zbyt dużą ilością spotkanych obiektów lub obiekty te znajdują się w dużych odległościach między sobą. W przypadku dużego zagęszczenia ruchu następuje zawracanie statku własnego, które trwa do czasu aż sytuacja niebezpieczna ulegnie poprawie.

Wykorzystanie w programie PROGNEURAL sztucznej sieci neuronowej do określania domen spotkanych obiektów, a następnie do wyznaczania bezpiecznej trajektorii własnego statku, umożliwia wprowadzenie wiedzy heurystycznej podobnej do tej, jaką posiada doświadczony nawigator.

## LITERATURA

- [1] Colley B.A., Curtis R.G., Stockel C.T.: *Manoeuvring times, domains and arenas*, Journal of Navigation, No 36, 1983, p.324-328
- [2] Isaacs R.: *Differential games*, John Wiley and Sons, New York, 1965
- [3] Lisowski J.: *The analysis of differential game models of safe ship's control process*, Journal of Shanghai Maritime Institute, No 1, 1985, p.25-38
- [4] Lisowski J., Rak A., Czechowicz W.: *Neural network classifier for ship domain assessment*, Journal of Mathematics and Computers in Simulation, No 3-4, Vol.51, 2000, p.399-406
- [5] Lisowski J.: *The ship's safe control as a multi-step matrix game with the risk of collision*, 9<sup>th</sup> International Symposium on Dynamic Games and Applications, Adelaide, 2000, p.358-368
- [6] Lisowski J.: *Computational intelligence and optimization methods applied to safe ship's control-the dynamic programming and neural network methods*, Journal of Shanghai Maritime University, No 3, Vol.21, 2000, p.33-41
- [7] Lisowski J.: *Computational intelligence methods in the safe ship control process*, Polish Maritime Research, No 2, Vol.8, 2001, p.18-24
- [8] Lisowski J.: *A positional game model of safe ship control process*, 5<sup>th</sup> IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Glasgow, 2001, p.1-6
- [9] Lisowski J.: *Computational intelligence algorithms supporting navigator manoeuvring decisions to avoid collisions at sea*, International Maritime Conference, Sydney, 2002, p.1-8
- [10] Merz A.W., Karmarkar J.S.: *Collision avoidance systems and optimal turn manoeuvres*, Journal of Navigation, No 2, Vol.29, 1976, p.160-173
- [11] Miloh T., Sharma S.D.: *Maritime collision avoidance as a differential game*, Schifftechnik, No 24, 1977, p.69-88