

Józef Lisowski

Akademia Morska w Gdyni
Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki Okrętowej
81-225 Gdynia, ul. Morska 83
e-mail: jlis@am.gdynia.pl

**METODY KOMPUTEROWEGO WSPOMAGANIA
DECYZJI MANEWROWEJ NAWIGATORA
W SYTUACJACH KOLIZYJNYCH**

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono zastosowanie elementów teorii gier i sztucznej inteligencji do automatyzacji procesu sterowania obiektami ruchomymi na przykładzie bezpiecznego sterowania własnym statkiem w sytuacjach kolizyjnych podczas mijania się ze spotkanymi statkami. Przedstawiono algorytmy wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku wspomagające decyzję manewrową nawigatora w sytuacji kolizyjnej. Rozważania zilustrowano przykładami komputerowej symulacji w oprogramowaniu Matlab/Simulink bezpiecznych trajektorii statku w rzeczywistej sytuacji na morzu.

Słowa kluczowe:

nawigacja morska, bezpieczeństwo żeglugi, zapobieganie kolizjom, sterowanie rozgrywające, sterowanie optymalne.

WSTĘP

Do istotnych zagadnień teorii procesów decyzyjnych w nawigacji morskiej należy bezpieczne sterowanie statkiem. Problem bezkolizyjnych strategii w sterowaniu na morzu pojawia się już u Isaacs [7], zwanego „ojcem gier różniczkowych”, i rozwijany był przez wielu autorów zarówno w aspekcie teorii gier, jak i sterowania w warunkach niepewności. Chociaż sformułowanie problemu uniknięcia kolizji wydaje się całkiem oczywiste, to oprócz niepewności informacji, jaka wynikać może zarówno z oddziaływania zakłóceń hydrometeorologicznych, jak też nieprecyzyjnego charakteru reguł Międzynarodowego Prawa Drogi Morskiej (MPDM), istotna jest subiektywność nawigatora w ocenie sytuacji i podejmowanej

decyzji manewrowej [1, 2]. Tematyka wyznaczania strategii bezpiecznych jest nadal aktualna ze względu na ciągle rosnący ruch statków na poszczególnych akwenach, a jednocześnie z powodu zwiększających się wymagań bezpieczeństwa żeglugi i ochrony środowiska oraz rosnących możliwości komputerowego wspomaganie pracy nawigatorów [3, 4].

MODELE PROCESÓW STEROWANIA RUCHEM STATKU

W celu zapewnienia bezpieczeństwa żeglugi statki zobowiązane są respektować reguły MPDM. Jednak te reguły stosują się tylko do dwóch statków w zakresie dobrej widzialności, a w warunkach ograniczonej widzialności podają jedynie zalecenia ogólnego charakteru i nie są w stanie uwzględnić wszystkich niezbędnych warunków rzeczywistego procesu [6].

Rzeczywisty proces mijania się statków często zachodzi więc w warunkach nieokreśloności i konfliktu, przy nieściśłym współdziałaniu statków w myśl reguł MPDM. Dlatego celowe jest przedstawienie procesu oraz opracowanie i badanie dla celów praktycznych metod bezpiecznego sterowania statkiem z zastosowaniem elementów teorii gier. Konieczność jednoczesnego uwzględnienia strategii spotkanych statków oraz ich własności dynamicznych jako obiektów sterowania przesądza o zastosowaniu do opisu procesu modelu gry różniczkowej, często nazywanej przez inżynierów grą dynamiczną [5, 13, 14].

Ruch dynamiczny statków w czasie odbywa się pod wpływem wielkości sterujących u z odpowiednich dopuszczalnych zbiorów sterowania U :

$$U[U_w^{(\sigma)}, U_j^{(\sigma)}], \quad (1)$$

gdzie:

$U_w^{(\sigma)}$ — zbiór strategii własnego statku;

$U_j^{(\sigma)}$ — zbiór strategii j spotkanego statku;

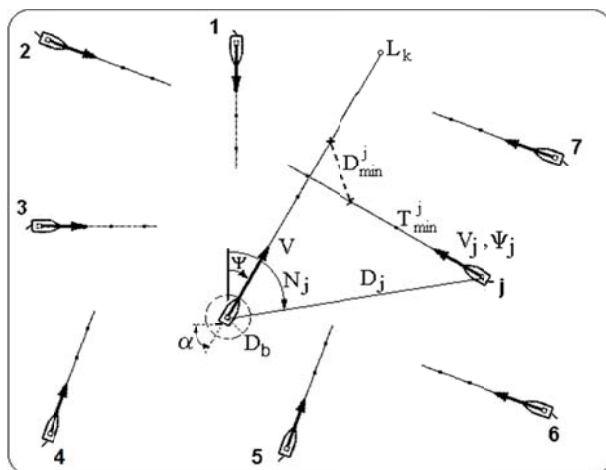
$\sigma = 0$ — oznacza symbolicznie stabilizację kursu lub trajektorii;

$\sigma = 1$ — oznacza symbolicznie realizację manewru antykolizyjnego w celu minimalizacji ryzyka kolizji, co w praktyce osiąga się spełnieniem następującej nierówności (rys. 1.):

$$D_{\min}^j = \min D_j(t) \geq D_b, \quad (2)$$

gdzie:

- D_{\min}^j — najmniejsza odległość zbliżenia własnego statku i j spotkanego statku;
 D_j — aktualna odległość do j statku;
 D_b — bezpieczna odległość zbliżenia w danych warunkach zależna od stopnia widzialności na morzu, reguł MPDM oraz własności dynamicznych statku;
 $\sigma = -1$ — oznacza symbolicznie manewrowanie statkiem w celu osiągnięcia najmniejszej odległości zbliżenia, na przykład podczas zbliżenia statku ratowniczego, przekazywania ładunku ze statku na statek, niszczenia okrętu nieprzyjaciela itp.



Rys. 1. Sytuacja mijania się własnego statku z j spotkanymi statkami

Źródło: opracowanie własne.

W przyjętej symbolice zapisu można wyróżnić następujące rodzaje sterowania ruchem statków:

- 1) sterowanie optymalne
 - a) stabilizacja kursu lub trajektorii $U[U_w^0 U_j^0]$;
- 2) gry jednostronne
 - a) unikanie kolizji za pomocą:
 - manewrów własnego statku $U[U_w^1 U_j^0]$,
 - manewrów spotkanego j statku $U[U_w^0 U_j^1]$,
 - manewrów kooperujących $U[U_w^1 U_j^1]$;
 - b) spotkanie statków $U[U_w^{-1} U_j^{-1}]$;

3) gry konfliktowe

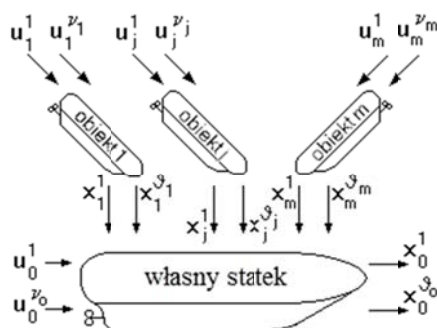
a) sytuacje jednostronnej gry dynamicznej $U[U_w^{-1}U_j^0]$ oraz $U[U_w^0U_j^{-1}]$

(na przykład niebezpieczna sytuacja wynikała z błędnej oceny procesu zbliżenia przez jedną ze stron przy braku obserwacji drugiej — jeden statek wyposażony w radar lub system antykolizyjny, drugi z uszkodzonym radarem lub bez tego wyposażenia);

b) sytuacje pościgu $U[U_w^{-1}U_j^1]$ oraz $U[U_w^1U_j^{-1}]$.

UOGÓLNIONY MODEL PROCESU STEROWANIA RUCHEM STATKU W SYTUACJACH KOLIZYJNYCH

Najbardziej adekwatnym modelem procesu mijania się statku z j spotkanymi obiektami jest model gry dynamicznej j uczestników (rys. 2.).



Rys. 2. Schemat uogólnionego modelu gry dynamicznej procesu sterowania statkiem

Źródło: opracowanie własne.

Własności procesu opisane są przez równanie stanu:

$$\dot{x}_i = f_i[(x_0^{g_0}, x_1^{g_1}, \dots, x_j^{g_j}, \dots, x_m^{g_m}), (u_0^{v_0}, u_1^{v_1}, \dots, u_j^{v_j}, \dots, u_m^{v_m}), t] \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, (j \cdot g_j + g_0), j = 1, 2, \dots, m,$$

gdzie:

$\vec{x}_0^{g_0}(t) - g_0$ — wymiarowy wektor stanu własnego statku;

$\vec{x}_j^{g_j}(t) - g_j$ — wymiarowy wektor stanu j -tego obiektu;

$\vec{u}_0^{v_0}(t) - v_0$ — wymiarowy wektor sterowania własnego statku;
 $\vec{u}_j^{v_j}(t) - v_j$ — wymiarowy wektor sterowania j -tego obiektu [9, 12].

Ograniczenia stanu i sterowania wynikają z zachowania bezpiecznej odległości mijania D_b z zachowaniem reguł manewrowania MPDM:

$$g_j(x_j^{g_j}, u_j^{v_j}) \leq 0. \tag{4}$$

Synteza sterowania rozgrywającego statkiem polega na minimalizacji kryterium jakości sterowania danego w postaci całkowitej i końcowej:

$$I_0^j = \int_{t_0}^{t_k} [x_0^{g_0}(t)]^p dt + r_j(t_k) + d(t_k) \rightarrow \min. \tag{5}$$

Wyplata całkowita przedstawia straty drogi statku na wymijanie spotkanych obiektów, a wyplata końcowa określa końcowe ryzyko kolizji do j -tego obiektu i końcowe odchylenie trajektorii własnego statku od zadanej trasy rejsu.

METODY WSPOMAGANIA DECYZJI MANEROWEJ NAWIGATORA

Uwzględniając dużą złożoność modelu gry dynamicznej, do praktycznej syntezy programów sterowania formułuje się modele uproszczone, z jednoczesnym zastosowaniem wybranych metod sztucznej inteligencji [8]. Poszczególnym modelom procesu można przyporządkować odpowiednie algorytmy komputerowego wspomaganie decyzji manewrowej nawigatora w sytuacjach kolizyjnych (tab. 1.).

Tabela 1. Metody komputerowego wspomaganie decyzji manewrowej nawigatora w sytuacji kolizyjnej na morzu

Program wspomaganie decyzji manewrowej	Model procesu sterowania	Metoda syntezy sterowania	Rodzaj decyzji manewrowej
<i>AWDM_gpnk</i>	gra pozycyjna niekooperacyjna	programowanie liniowe dualne	trajektoria rozgrywająca
<i>AWDM_gmnk</i>	gra macierzowa niekooperacyjna	programowanie liniowe dualne	trajektoria rozgrywająca
<i>AWDM_gpk</i>	gra pozycyjna kooperacyjna	programowanie liniowe dualne	trajektoria rozgrywająca
<i>AWDM_odyn</i>	optymalizacja dynamiczna	programowanie dynamiczne sztuczna sieć neuronowa	trajektoria optymalna
<i>AWDM_okin</i>	optymalizacja kinematyczna	programowanie liniowe	trajektoria optymalna

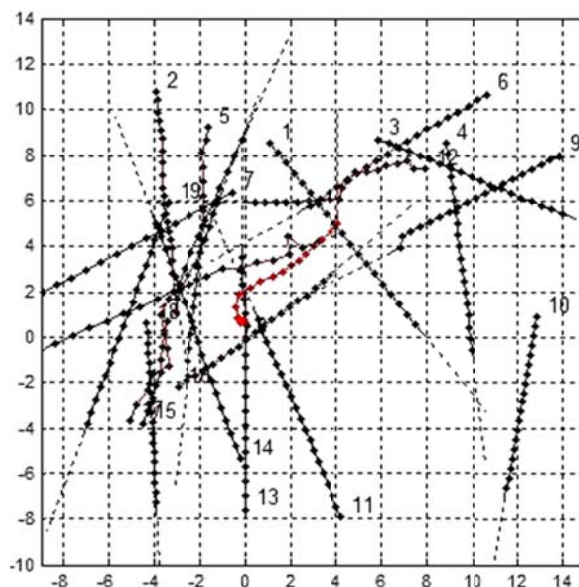
Źródło: opracowanie własne.

Algorytm *AWDM_gpnk*

Do syntezy bezpiecznego sterowania statkiem wykorzystuje się uogólniony model gry dynamicznej, uproszczony do wieloetapowej gry pozycyjnej j uczestników niekooperujących ze sobą [10]. Optymalne sterowanie własnym statkiem określa się, wyznaczając zbiory dopuszczalnych strategii spotkanych statków względem własnego statku oraz zbiory dopuszczalnych strategii własnego statku względem każdego ze spotkanych statków. Następnie wyznacza się optymalną strategię pozycyjną własnego statku z warunku:

$$I^* = \min_{u_0} \max_{u_j} \min_{u'_0} I[x_0, L_k] = S_0^* \quad (6)$$

Funkcję celu sterowania własnego statku S_0 charakteryzuje odległość własnego statku do najbliższego punktu zwrotu L_k na zadanej trasie rejsu. Kryterium wyboru optymalnej trajektorii własnego statku sprowadza się do wyznaczenia jego kursu i prędkości zapewniających najmniejsze straty drogi na bezpieczne mijanie spotkanych statków, w odległości nie mniejszej niż założona wartość D_b , z uwzględnieniem dynamiki własnego statku w postaci czasu wyprzedzenia manewru (rys. 3.).



Rys. 3. Bezpieczna trajektoria własnego statku w sytuacji mijania się z $j = 19$ spotkanymi statkami, w ograniczonej widzialności na morzu $D_b = 2 Mm$, wyznaczona przez program *AWDM_gpnk*, wypłata końcowa gry: $r(t_k) = 0$, $d(t_k) = 4.11 Mm$

Źródło: opracowanie własne.

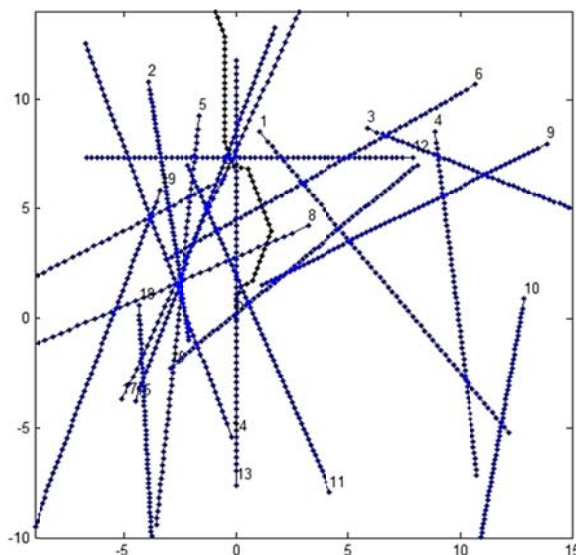
Algorytm $AWDM_gmnk$

Pomijając równania dynamiki statku, podstawowy model gry dynamicznej procesu zapobiegania kolizjom sprowadza się do gry macierzowej j uczestników niekooperujących ze sobą [11].

W grze macierzowej gracz I (własny statek) oraz gracze II (j spotkanych statków) mają do dyspozycji pewną liczbę strategii czystych. Ograniczenia na wybór strategii wynikają z reguł MPDM. Najczęściej gra nie ma punktu siodłowego w zakresie jej rozwiązania poprzez zastosowanie strategii czystych. W celu rozwiązania tego problemu można posłużyć się dualnym programowaniem liniowym. W zagadnieniu dualnym gracz I dąży do minimalizacji ryzyka kolizji, natomiast gracz II do maksymalizacji ryzyka kolizji. Składowe strategii mieszanej wyrażają rozkład prawdopodobieństwa użycia przez graczy ich strategii czystych. W rezultacie dla kryterium sterowania w postaci:

$$I^* = \min_{u_0} \max_{u_j} r_j \quad (7)$$

otrzymuje się macierz prawdopodobieństwa użycia poszczególnych strategii czystych. Rozwiązaniem zadania bezpiecznego sterowania jest strategia o największym prawdopodobieństwie (rys. 4).



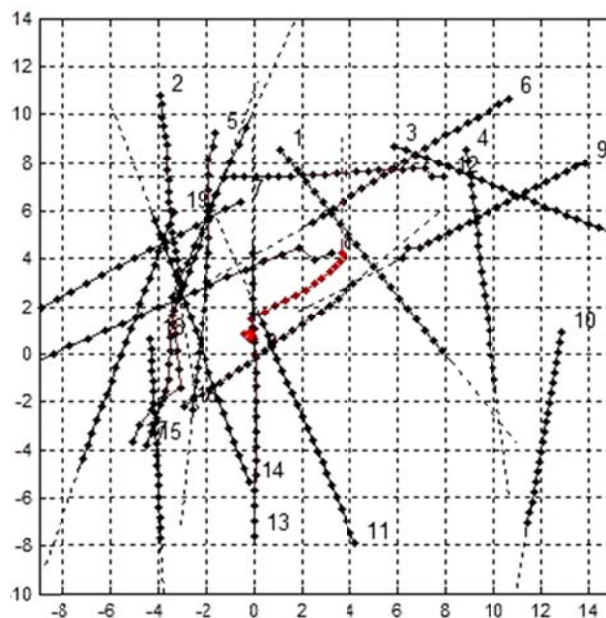
Rys. 4. Bezpieczna trajektoria własnego statku w sytuacji mijania się z $j = 19$ spotkanymi statkami, w ograniczonej widzialności na morzu $D_b = 2 Mm$, wyznaczona przez program $AWDM_gmnk$, wypłata końcowa gry: $r(t_k) = 0$, $d(t_k) = 4.36 Mm$

Źródło: opracowanie własne.

Algorytm *AWDM_gpk*

Kryterium jakości sterowania (6) dla pozycyjnej gry kooperacyjnej przyjmuje postać (rys. 5.):

$$I^* = \min_{u_0} \min_{u_j} \min_{u'_0} I[x_0, L_k] = S_0^* . \quad (8)$$



Rys. 5. Bezpieczna trajektoria własnego statku w sytuacji mijania się z $j = 19$ spotkanymi statkami, w ograniczonej widzialności na morzu $D_b = 2 Mm$, wyznaczona przez program *AWDM_gpk*, wypłata końcowa gry: $r(t_k) = 0$, $d(t_k) = 3.63 Mm$

Źródło: opracowanie własne.

Algorytm *AWDM_odyn*

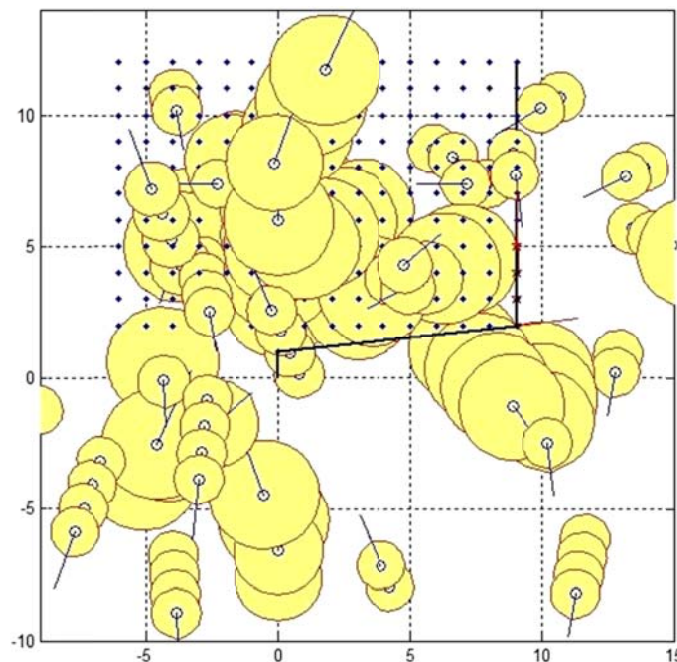
Kryterium bezpiecznego sterowania jest spełnienie ograniczenia w postaci ruchomej domeny przyporządkowanej spotkanemu statkowi:

$$g_j(x_j, t) \leq 0. \quad (9)$$

Domena w postaci koła, sześciokąta, elipsy lub paraboli jest generowana przez sztuczną sieć neuronową Neural Network Toolbox MATLAB, wcześniej nauczoną przez większą grupę doświadczonych nawigatorów, na przykład na kursach ARPA (rys. 6.).

Stosując programowanie dynamiczne Bellmana, kryterium optymalnego sterowania sprowadza się do zapewnienia najmniejszych strat drogi na bezpieczne wymijanie spotkanych statków, co przy stałej prędkości ruchu sprowadza się do sterowania czasooptymalnego:

$$I^* = \int_0^{t_k} V dt \cong V \int_0^{t_k} dt \rightarrow \min. \quad (10)$$



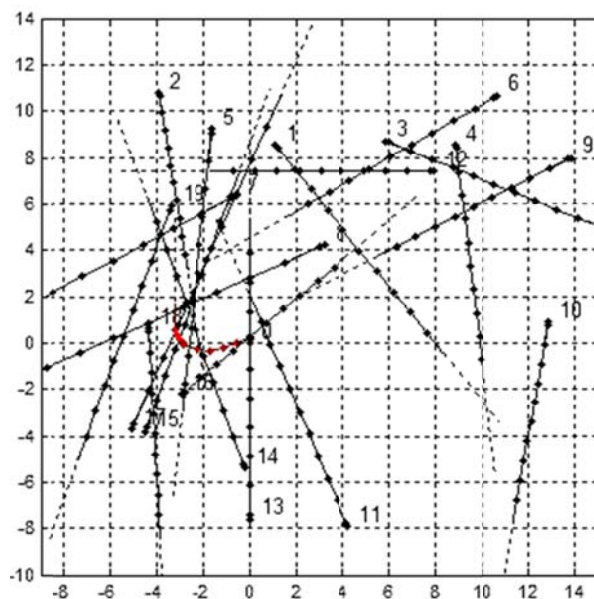
Rys. 6. Bezpieczna trajektoria własnego statku w sytuacji mijania się $z_j = 19$ spotkanymi statkami, w ograniczonej widzialności na morzu $D_b = 2 Mm$, wyznaczona przez program *AWDM_dyn*, wartość końcowa kryterium: $t_k^* = 1.67 h$

Źródło: opracowanie własne.

Algorytm *AWDM_okin*

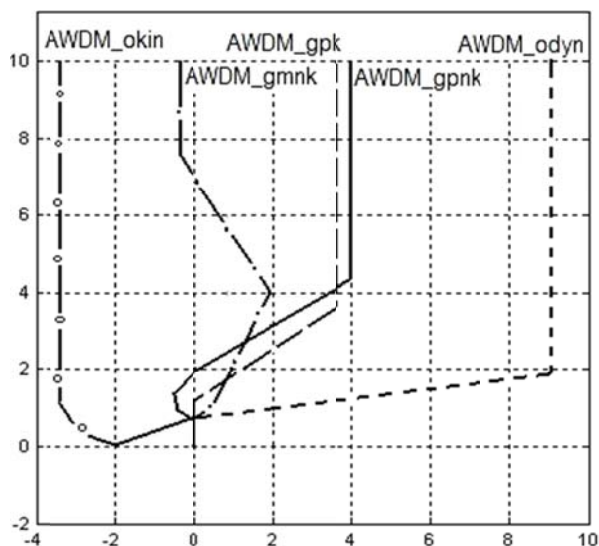
Kryterium jakości sterowania (6) dla nierozgrywającej optymalizacji kinematycznej przyjmuje postać (rys. 7.):

$$I^* = \min_{u_0} I[x_0, L_k] = S_0^*. \quad (11)$$



Rys. 7. Bezpieczna trajektoria własnego statku w sytuacji mijania się z $j = 19$ spotkanymi statkami, w ograniczonej widzialności na morzu $D_b = 2 Mm$, wyznaczona przez program $AWDM_odyn$, wartość końcowa kryterium: $d(t_k) = 3.25 Mm$

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8. Porównanie bezpiecznych trajektorii własnego statku wyznaczonych przez poszczególne programy komputerowego wspomaganie decyzji manewrowej nawigatora w sytuacji $j = 19$ spotkanych statków

Źródło: opracowanie własne.

WNIOSKI

Zastosowanie uproszczonych modeli gry dynamicznej procesu do syntezy komputerowych programów wspomaganie umożliwia wyznaczenie bezpiecznej trajektorii optymalnej i rozgrywającej statku w sytuacjach mijania się z większą liczbą spotkanych statków jako pewnej sekwencji manewrów kursem i prędkością.

Opracowane programy komputerowe uwzględniają reguły MPDM i czas wyprzedzenia manewru, aproksymujący własności dynamiczne własnego statku, a także oceniają odchylenie końcowe trajektorii rzeczywistej od zadanej.

Przedstawione programy komputerowe są formalnymi modelami procesów decyzyjnych nawigatora prowadzącego statek i mogą być zastosowane w systemie komputerowego wspomaganie nawigatora przy podejmowaniu decyzji manewrowej w sytuacjach kolizyjnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bist D. S., *Safety and security at sea*, Butter Heinemann, Oxford-New Delhi 2000.
- [2] Bole A., Dineley B., Wall A., *Radar and ARPA manual*, Elsevier, Amsterdam — Tokyo 2006.
- [3] Cahill R. A., *Collisions and their causes*, The Nautical Institute, London 2002.
- [4] Cockcroft A. N., Lameijer J. N. F., *The collision avoidance rules*, Elsevier, Amsterdam — Tokyo 2002.
- [5] Engwerda J. C., *LQ dynamic optimization and differential games*, John Wiley & Sons, West Sussex 2005.
- [6] Gluver H., Olsen D., *Ship collision analysis*, A. A. Balkema, Rotterdam — Brookfield 1998.
- [7] Isaacs R., *Differential games*, John Wiley & Sons, New York 1965.
- [8] Lisowski J., *Algorytmy komputerowego wspomaganie nawigatora w sytuacjach kolizyjnych*, „Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne”, 2011, nr 7, s. 671–673.
- [9] Lisowski J., *The multistage positional game of marine objects with different degree of cooperation*, ‘Solid State Phenomena’, 2012, Vol. 180, pp. 56–63.

-
- [10] Millington I., Funge J., *Artificial intelligence for games*, Elsevier, Amsterdam — Tokyo 2009.
- [11] Modarres M., *Risk analysis in engineering*, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2006.
- [12] Nisan N., Roughgarden T., Tardos E., Vazirani V. V., *Algorithmic game theory*, Cambridge University Press, New York 2007.
- [13] Osborne M. J., *An introduction to game theory*, Oxford University Press, New York 2004.
- [14] Straffin P. D., *Teoria gier*, Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa 2001.

COMPUTER SUPPORT METHODS OF NAVIGATOR MANOEUVRING DECISION IN COLLISIONS SITUATIONS

ABSTRACT

The paper introduces the application of selected methods of game theory and artificial intelligence for automation of the control process of moving objects on the example of safe ship steering in a collision situation. For each approximated model of the dynamic game, an appropriate method of safe steering to support the navigator decision in a collision situation has been assigned. The considerations have been illustrated an example of a computer simulation in Matlab/Simulink of several methods to determine the safe ship's trajectory in situations of passing many of the objects encountered, recorded on the ship's radar screen in real navigational situation at sea.

Keywords:

marine navigation, safety of navigation, collision avoidance, control unfolding, optimal control.