

# Model symulacyjny procesu bezpiecznego sterowania ruchem statku

## *Simulation model of the safe ship motion control process*

W artykule przedstawiono dokładny model ruchu statków na morzu, w postaci modelu gry różniczkowej  $j$  obiektów sterowania, uwzględniający ich kinematykę i dynamikę oraz warunki nieokreśloności i konfliktu, przy nie ścisłym współdziałaniu według zasad międzynarodowego prawa drogi morskiej MPDM. Podano nieliniowe równania stanu procesu, nieliniowe i zmienne w czasie ograniczenia stanu i sterowania oraz kryterium jakości sterowania rozgrywanego w postaci wypłaty całkowitej i końcowej. W części końcowej przedstawiono wyniki komputerowej symulacji modelu dla manewru antykolizyjnego zmiany kursu własnego statku.

**Słowa kluczowe:**

transport morski, bezpieczeństwo żeglugi, teoria gier.

The paper presents an accurate model of ships traffic, in the form of differential game model of  $j$  control objects, in view of their kinematics and dynamics and conditions of uncertainty and conflict, with no close cooperation according to the principles of international collision regulations COLREG. Given the non-linear equations of state of the process, non-linear and time varying constraints the state and control variables and the index of quality control in the form of integral and final payment. The final section presents the results of a computer simulation model for anti-collision maneuver to change the own ship course.

**Key words:**

maritime transport, safety of navigation, game theory.

### Wstęp

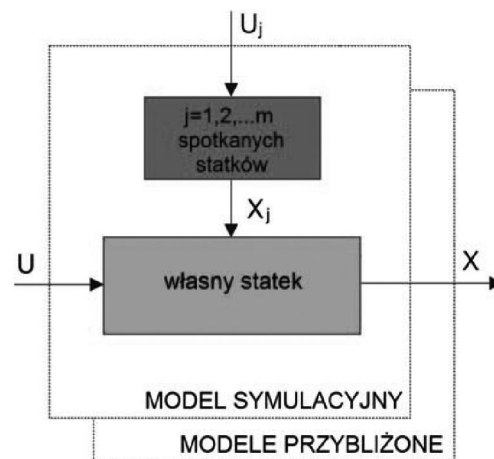
Według statystyk Lloyd'a ilość utraconego tonażu spowodowanego kolizjami statków, w stosunku do wszystkich strat poniesionych w wyniku zatonięcia, pożaru, zaginięcia czy rozbicia, wynosi w poszczególnych latach od kilku do kilkunastu procent (Bist, 2000). Zakłada się, że około połowę tych strat można uniknąć stosując lepsze metody komputerowo wspomaganego bezpiecznego sterowania ruchem statku, szczególnie spośród najnowszych metod nowoczesnej teorii sterowania automatycznego — optymalizacji statycznej i dynamicznej z ograniczeniami stanu oraz metod sztucznej inteligencji — sterowania rozmytego, sieci neuronowych, systemów ekspertowych i programowania ewolucyjnego. Sposób sterowania statkiem, będącym wielowymiarowym i nieliniowym obiektem dynamicznym, zależy od zakresu dokładności informacji o aktualnej sytuacji nawigacyjnej oraz od przyjętego modelu procesu. Przy opracowywaniu dokładnego modelu jako modelu symulacyjnego procesu istotne jest uwzględnienie: równań kinematyki i dynamiki własnego statku, zakłóceń pochodzących od falowania morza oraz od oddziaływania wiatru i prądu morskiego, ograniczeń nawigacyjnych, strategii spotkanych obiektów oraz funkcji celu stero-

wania (Osborne, 2004). Natomiast do syntezy algorytmów sterowania pracujących w czasie rzeczywistym stosuje się modele przybliżone (rys. 1).

Rysunek 1

Schemat blokowy modeli procesu sterowania:

$U$  — wektor sterowania własnym statkiem,  $U_j$  — wektor sterowania  $j$  spotkanego statku,  $X_j$  — wektor stanu  $j$  spotkanego statku,  $X$  — wektor stanu własnego statku



Źródło: opracowanie własne.

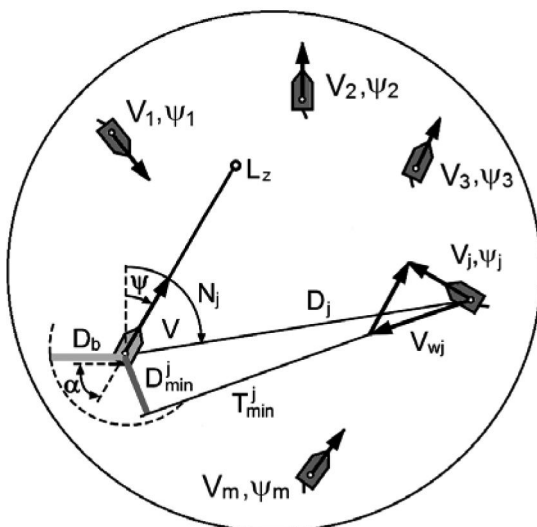
Niewątpliwym wkładem do zwiększenia bezpieczeństwa żeglugi wniosło zastosowanie radarowego systemu antykolizyjnego ARPA (ang. *Automatic Radar Plotting Aids*; Kouemou, 2009, s. 61–86).

## Proces rozgrywanego sterowania statkiem

Na proces sterowania w sytuacjach kolizyjnych składa się ruch względny własnego statku z prędkością  $V$  i kursem  $\psi$  oraz ruch  $j = 1, 2, \dots, m$  spotkanych statków, poruszających się każdy z prędkością  $V_j$  i kursem  $\psi_j$ . Wielkości charakteryzujące sytuację w postaci odległości  $D_j$  i namiaru  $N_j$  do  $j$  obiektu mierzone są za pomocą radarowego systemu antykolizyjnego ARPA. Standardowy system ARPA umożliwia automatyczne śledzenie do 20 obiektów, wyznaczenie ich prędkości i kursu 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*) (rys. 2).

Rysunek 2

Sytuacja mijania się własnego statku z  $m$  spotkanymi statkami



Źródło: opracowanie własne.

Wykorzystanie systemu antykolizyjnego ARPA dla zwiększania bezpieczeństwa ruchu statków na morzu wymaga ponadto jego uzupełniania w algorytmie komputerowego wspomaganie decyzji manewrowej nawigatora w czasie rzeczywistym, w każdej skomplikowanej sytuacji nawigacyjnej, eliminujące subiektywność człowieka i uwzględniające nieokre-

śloność sytuacji oraz własności rozgrywanej procesu sterowania (Perez, 2005).

Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy układu bezpiecznego sterowania statkiem w sytuacjach kolizyjnych na morzu, wykorzystującego informację z pokładowego systemu antykolizyjnego ARPA. Zadaniem układu sterowania jest uniknięcie kolizji, które polega na sterowaniu własnym statkiem w taki sposób, aby najmniejsza odległość zbliżenia  $D_{\min}^j$  stała się większa od ustalonej w danych warunkach nawigacyjnych bezpiecznej odległości mijania  $D_b$ . Osiąga się to najpierw poprzez wybór bezpiecznego manewru kursem  $\Delta\psi$  lub/i prędkością  $\Delta V$ , bądź bezpiecznej trajektorii statku jako sekwencji kolejnych zmian kursu i prędkości według wcześniej przyjętego algorytmu komputerowego wspomaganie sterowania (Engwerda, 2005).

Schematowi funkcjonalnemu systemu sterowania odpowiada w praktyce pewna realizacja sprzętowa w postaci systemu zintegrowanej nawigacji. Zakres funkcji standardowego systemu ARPA kończy się na symulacji *TRIAL MANOEUVRE* wybranego przez nawigatora manewru zmiany kursu lub prędkości statku (rys. 4).

W praktyce istnieje wiele możliwych manewrów uniknięcia kolizji, z których należy wybrać manewr optymalny, zapewniający minimum ryzyka kolizji lub strat drogi na bezpieczne wymijanie spotkanych statków (rys. 5).

Do wyboru optymalnego manewru antykolizyjnego służy komputerowe wspomaganie decyzji manewrowej nawigatora (rys. 6).

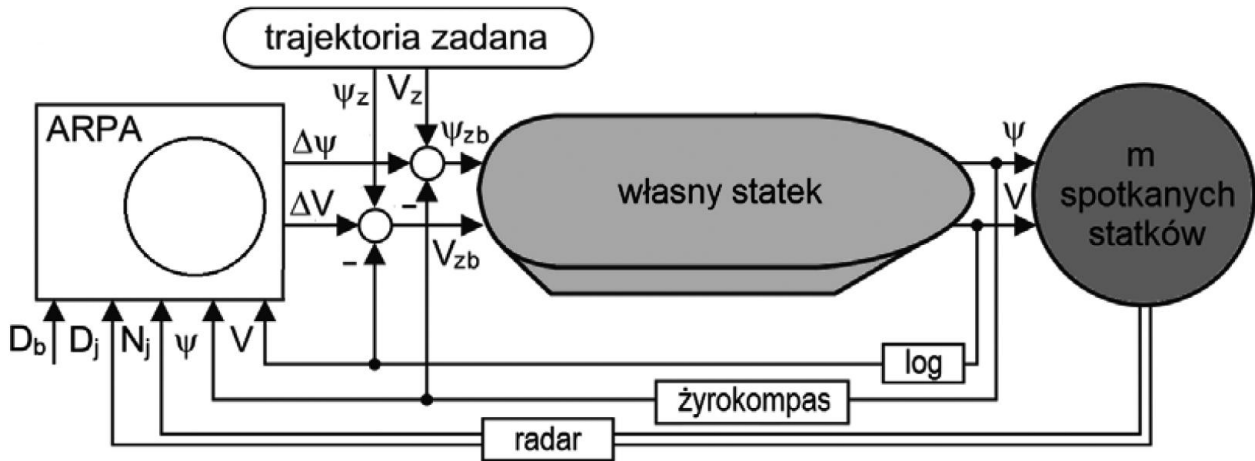
Idea działania układu polega na pobieraniu z systemu ARPA danych potrzebnych do obliczeń antykolizyjnych, następnie wprowadzanie tych danych do programu realizującego wybrany algorytm sterowania i wyświetlanie wyników obliczeń w postaci zobrazenia wyznaczonej bezpiecznej trajektorii statku własnego wraz z wartością odchylenia od zadanego kursu (Wells, 2013).

## Model gry różniczkowej procesu

W celu zapewnienia bezpieczeństwa żeglugi statki zobowiązane są respektować reguły prawne w postaci reguł Międzynarodowego Prawa Drogi Morskiej (MPDM). Jednak te reguły stosują się tylko do dwóch statków w zakresie dobrej widzialności. W warunkach ograniczonej widzialności zaś podają tylko zalecenia ogólnego charakteru i nie są w stanie uwzględnić wszystkich niezbędnych warunków rzeczywistego procesu. Tak więc rzeczywisty proces mijania się statków zachodzi w warunkach nieokreśloności i konfliktu przy nieściśłym współdziałaniu statków w myśl zasad MPDM. Dlatego celowe jest przedstawienie procesu oraz opracowa-

Rysunek 3

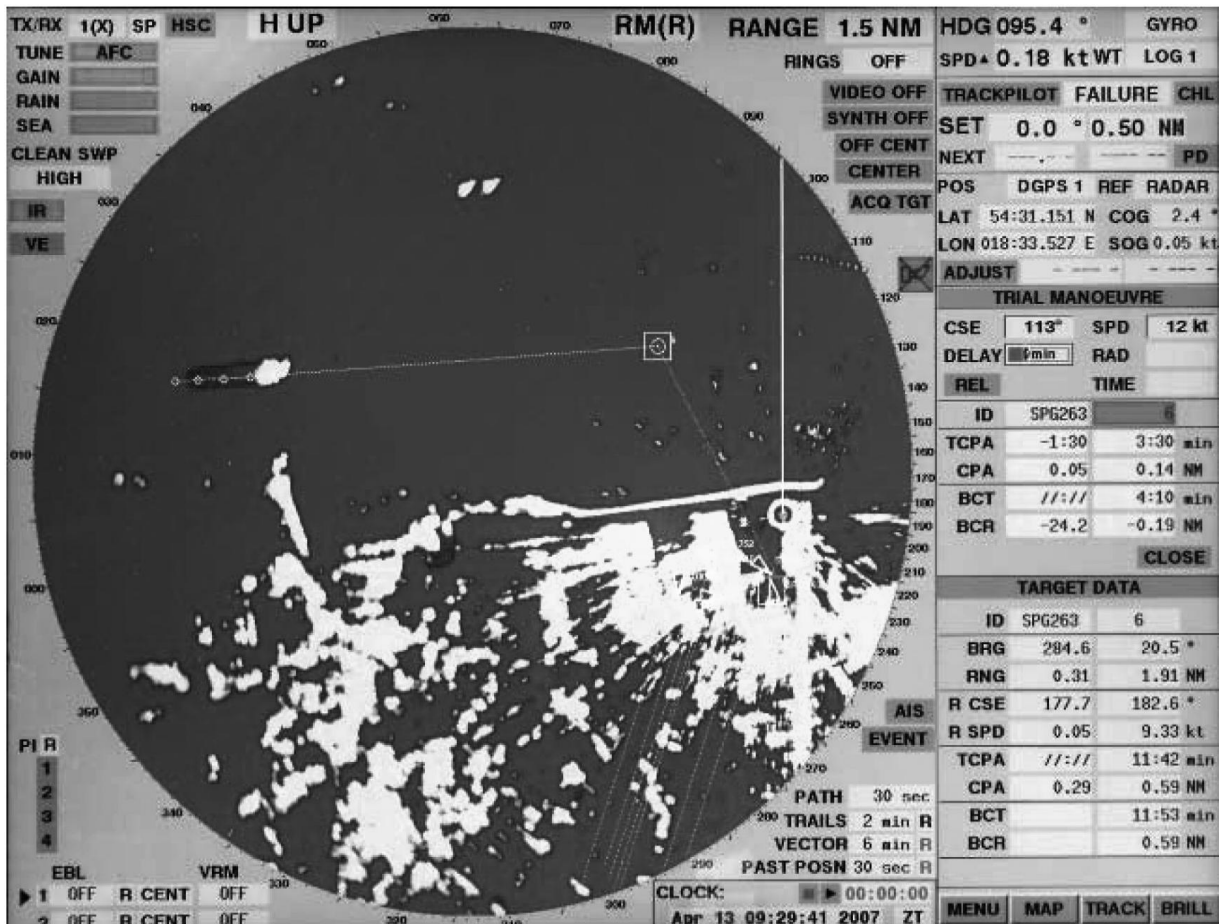
Schemat blokowy układu bezpiecznego sterowania statkiem w sytuacjach kolizyjnych



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 4

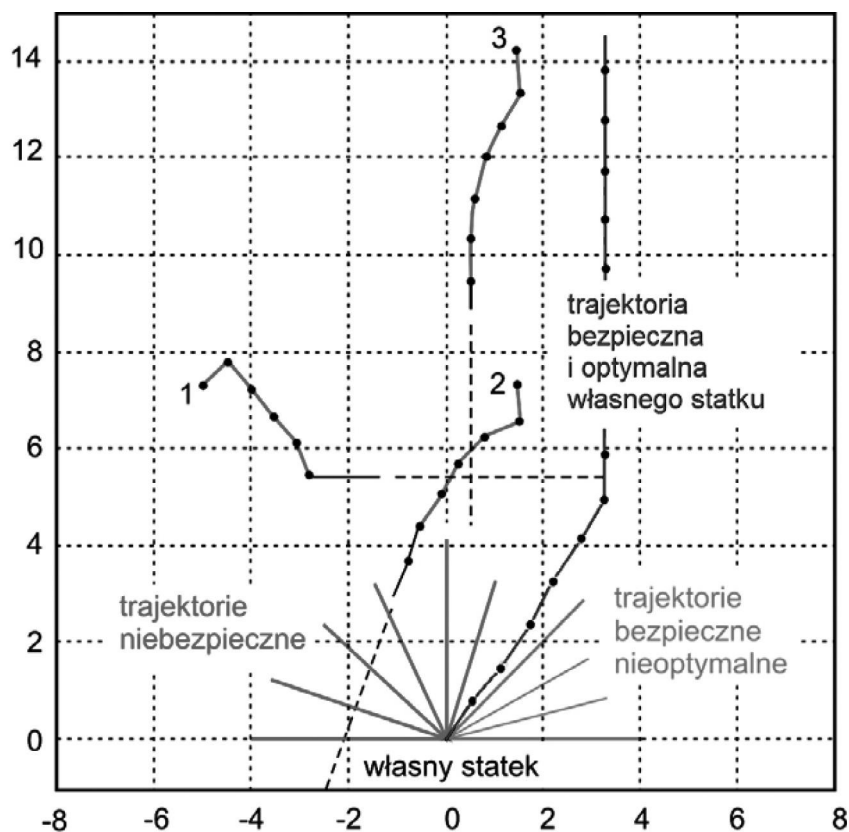
Symulacja manewru antykolizyjnego TRIAL MANOEUVRE w systemie ARPA firmy Raytheon



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 5

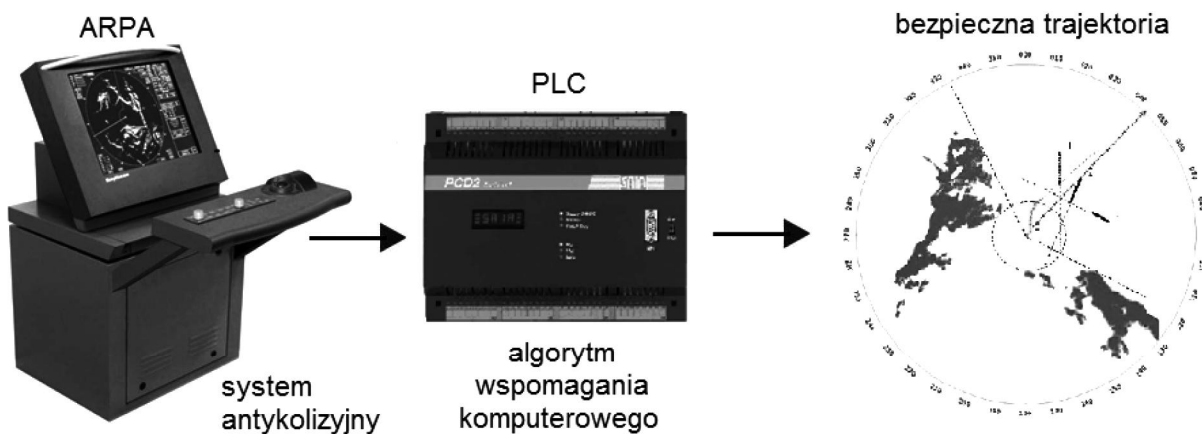
Możliwe trajektorie własnego statku w sytuacji mijania się ze spotkanymi statkami



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 6

Układ komputerowego wspomaganie decyzji manewrowej nawigatora w sytuacji kolizyjnej na morzu



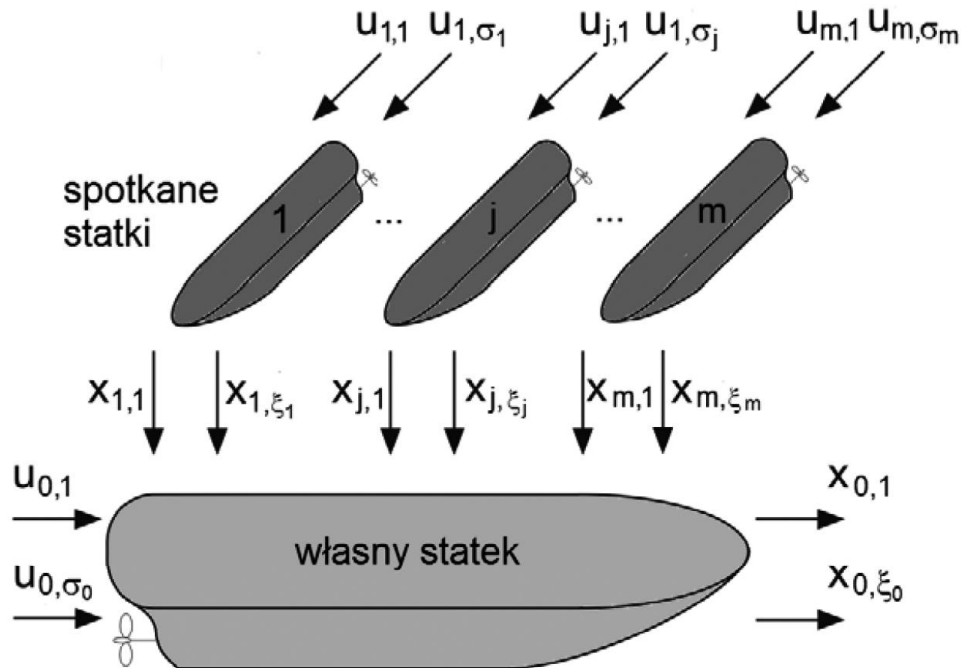
Źródło: opracowanie własne.

nie i badanie do celów eksploatacji metod bezpiecznego sterowania statkiem z zastosowaniem reguł teorii gier (Isaacs, 1965). Konieczność jednoczesnego uwzględnienia strategii spotkanych

obiektów oraz własności dynamicznych statków jako obiektów sterowania przesądza o zastosowaniu do opisu obiektu modelu gry różniczkowej (rys. 7; Straffin, 2001).

Rysunek 7

Układ rozgrywającego sterowania własnym statkiem w sytuacji mijania się ze spotkanymi statkami



Źródło: opracowanie własne.

Proces sterowania rozgrywającego opisany jest przez równanie stanu w postaci ogólnej:

$$\dot{x}_i = f_i[(x_{0,\xi_0}, x_{1,\xi_1}, \dots, x_{j,\xi_j}, \dots, x_{m,\xi_m}), (u_{0,\sigma_0}, u_{1,\sigma_1}, \dots, u_{j,\sigma_j}, \dots, u_{m,\sigma_m})] \quad (1)$$

oraz przez następujące szczegółowe równania stanu:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{0,1} &= x_{0,2} \\ \dot{x}_{0,2} &= a_1 x_{0,2} x_{0,3} + a_2 x_{0,3} |x_{0,3}| + b_1 x_{0,3} |x_{0,3}| u_{0,1} \\ \dot{x}_{0,3} &= a_4 x_{0,3} |x_{0,3}| |x_{0,4}| x_{0,4} (1 + x_{0,4}) + a_5 x_{0,2} x_{0,3} x_{0,4} |x_{0,4}| + a_6 x_{0,2} x_{0,3} x_{0,4} + a_7 x_{0,3} |x_{0,3}| + \\ &\quad a_8 x_{0,5} |x_{0,5}| x_{0,6} + b_2 x_{0,3} x_{0,4} |x_{0,3}| u_{0,1} \\ \dot{x}_{0,4} &= a_3 x_{0,3} x_{0,4} + a_4 x_{0,3} x_{0,4} |x_{0,4}| + a_5 x_{0,2} x_{0,2} + a_9 x_{0,2} + b_2 x_{0,3} u_{0,1} \\ \dot{x}_{0,5} &= a_{10} x_{0,5} + b_3 u_{0,2} \\ \dot{x}_{0,6} &= a_{11} x_{0,6} + b_4 u_{0,3} \\ \dot{x}_{j,1} &= -x_{0,3} + x_{j,2} x_{0,2} + x_{j,3} \cos x_{j,3} \\ \dot{x}_{j,2} &= -x_{0,2} x_{j,1} + x_{j,3} \sin x_{j,3} \\ \dot{x}_{j,3} &= -x_{0,2} + b_{4+j} x_{j,3} u_{j,1} \\ \dot{x}_{j,4} &= a_{11+j} x_{j,4} |x_{j,4}| + b_{5+j} u_{j,2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Stan procesu  $x$  jest reprezentowany przez następujące mierzalne wielkości rzeczywiste:

$\bar{x}_{0,\xi_0}(t)$  —  $\xi_0$  wymiarowy wektor stanu własnego statku:

- $x_{0,1}$  — kurs  $\psi$ ,
- $x_{0,2}$  — prędkość kątowna zwrotu  $\dot{\psi}$ ,
- $x_{0,3}$  — prędkość liniowa  $V$ ,
- $x_{0,4}$  — kąt dryfu  $\beta$ ,
- $x_{0,5}$  — prędkość obrotowa  $n$  śruby napędu głównego,
- $x_{0,6}$  — skok  $H$  śruby napędu głównego.

$\bar{x}_{j,\xi_j}(t)$  —  $\xi_j$  wymiarowy wektor stanu  $j$  spotkanego statku:

- $x_{j,1}$  — odległość  $D_j$  do  $j$  spotkanego statku,
- $x_{j,2}$  — namiar  $N_j$  na  $j$  spotkany statek,
- $x_{j,3}$  — kurs  $\psi_j$  spotkanego  $j$  statku,
- $x_{j,4}$  — prędkość  $V_j$  spotkanego  $j$  statku.

Sterowanie procesem  $u$  realizowane jest przez następujące wielkości rzeczywiste:

- $\bar{u}_{0,\sigma_0}(t)$  —  $\sigma_0$  wektor sterowania własnym statkiem:
- $u_{0,1}$  — zadany kąt az wychylenia steru,
- $u_{0,2}$  — zadana prędkość obrotowa  $n_z$  śruby napędu głównego,
- $u_{0,3}$  — zadany skok  $H_z$  śruby napędu głównego.

- $\bar{u}_{j,\sigma_j}(t)$  —  $\sigma_j$  wektor sterowania spotkanego statku:
- $u_{j,1}$  — prędkość kątowna zwrotu  $\dot{\psi}_j$  spotkanego  $j$  statku,
- $u_{j,2}$  — siła naporu  $F_{nj}$  śruby napędowej  $j$  spotkanego statku.

Ograniczenia stanu i sterowania wynikają z zachowania bezpiecznej odległości mijania  $D_b$  zgodnie z prawnymi regułami manewrowania *MPDM*:

$$g_j(x_{j,\xi_j}, u_{j,\sigma_j}) \leq 0 \quad (3)$$

Ograniczenia, w nawigacji morskiej noszące nazwę domen statków, przyjmują kształt koła, elipsy, sześciokąta lub paraboli i mogą być wygenerowane na przykład przez sztuczną sieć neuronową.

Synteza sterowania rozgrywającego statkiem polega na minimalizacji funkcji celu danej w postaci wypłaty całkowitej i końcowej gry:

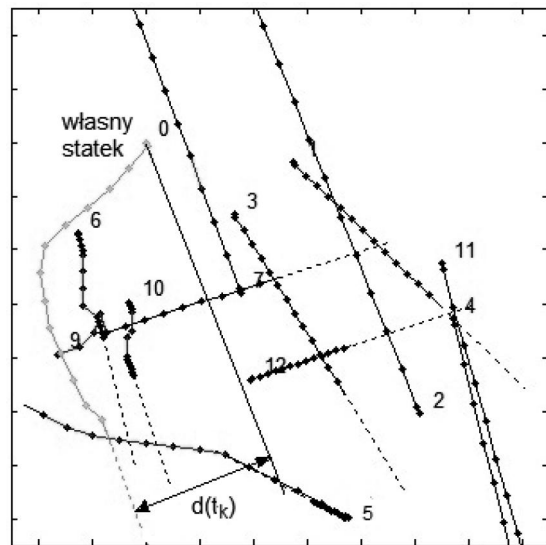
$$I_{0,j} = \int_{t_0}^{t_k} [x_{0,\xi_0}(t)]^2 dt + r_j(t_k) + d(t_k) \rightarrow \min \quad (4)$$

Wypłata całkowita gry przedstawia straty drogi własnego statku na wymijanie spotkanych statków i określa końcowe wartości ryzyka kolizji  $r_j(t_k)$  do  $j$  spotkanego statku oraz odchylenia rzeczywistej trajektorii własnego statku  $d(t_k)$  od zadanej (rys. 8).

Model gry różniczkowej stanowi model symulacyjny procesu bezpiecznego sterowania statkiem w sytu-

Rysunek 8

Wypłata końcowa  $d(t_k)$  gry różniczkowej procesu mijania się statków na morzu



Źródło: opracowanie własne.

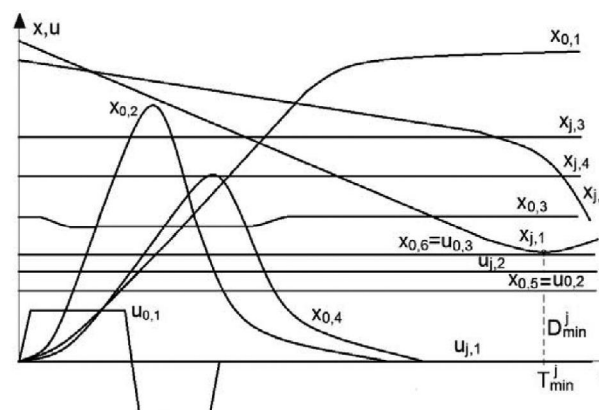
acjach kolizyjnych i służy do testowania opracowywanych programów komputerowego wspomaganie decyzji nawigatora (Mesterton-Gibbons, 2001).

## Symulacja komputerowa modelu podstawowego procesu sterowania

Na rysunku 9 zilustrowano przebiegi zmiennych stanu i sterowania w czasie symulacji modelu podstawowego procesu sterowania ruchem statku podczas manewru antykolizyjnego zmianą kursu.

Rysunek 9

Przebiegi zmiennych stanu i wielkości sterujących modelu symulacyjnego procesu bezpiecznego sterowania statkiem



Źródło: opracowanie własne.

## Podsumowanie

Już przed laty Peter Padfield stwierdził że, *niepewność jest źródłem wszystkich bezpośrednich przyczyn zderzeń. Niepewność wynikająca z dwuznaczności przepisów o zapobieganiu zderzeniom, niepewność statku mającego pierwszeństwo drogi co do zamierzeń statku ustępującego z drogi, niepewność w ustaleniu, który z dwóch statków powinien stać się ustępującym, a który mający pierwszeństwo drogi, niepewność co do kursu obcego statku i co do jego położenia we mgle. W każdym wypadku zderzenia co najmniej jedna z tych niepewności przyczyniła się do wypadku w sposób zupełnie oczywisty* (Padfield, 1969, s. 301).

Ta analiza wyjaśnia fakt, że proces sterowania statkiem w sytuacjach kolizyjnych, przy spotkaniu

z większą ilością obiektów, często zachodzi w warunkach nieokreśloności i konfliktu, przy nie ścisłym współdziałaniu statków w myśl zaleceń przepisów międzynarodowego prawa drogi morskiej *MPDM*. Dlatego za najbardziej adekwatny model procesu przyjmuje się model gry różniczkowej ogólnie j statków jako obiektów sterowania. Model gry, gdyż uwzględnia strategię spotkanych obiektów jako tak zwanych „myślących graczy”, różniczkowej, gdyż musi zawierać opis dynamiki i kinematyki własnego statku oraz spotkanych statków. Na model gry składają się: nieliniowe i wielowymiarowe równania stanu, nieliniowe i zmienne w czasie ograniczenia stanu i sterowania oraz kryterium sterowania w postaci wypłaty całkowitej i końcowej. Podstawowy model gry różniczkowej spełnia rolę badawczego narzędzia symulacyjnego.

## Bibliografia

- Bist, D.S. (2000). *Safety and security at sea*. Oxford-New Delhi: Butter Heinemann.
- Engwerda, J.C. (2005). *LQ dynamic optimization and differential games*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Isaacs, R. (1965). *Differential games*. New York: John Wiley & Sons.
- Kouemou, G. (2009). Radar technology. Chapter 4 by Józef Lisowski: *Sensitivity of safe game ship control on base information from ARPA radar*. Croatia: In-tech.
- Mesterton-Gibbons, M. (2001). *An introduction to game theoretic modeling*. American Mathematical Society. Providence.
- Osborne, M.J. (2004). *An introduction to game theory*. New York: Oxford University Press.
- Padfield, P. (1969). *Zmora zderzeń*. Gdańsk: Wydawnictwo Morskie.
- Perez, T. (2005). *Ship motion control*. London: Springer.
- Straffin, P.D. (2001). *Game theory and strategy*. Warszawa: Scholar.
- Wells, D. (2013). *Games and mathematics*. Cambridge: Cambridge University Press.

## PWE poleca



W książce zostały przedstawione metody analizy strategicznej – najbardziej znane i najczęściej stosowane w praktyce zarządzania przedsiębiorstwami. Wykorzystanie tych metod pozwala ocenić rynkowe szanse przedsiębiorstwa oraz uniknąć często popełnianych błędów. Dzięki temu można zarówno ograniczyć ryzyko nietrafionych decyzji, jak i odnieść sukces na coraz silniej konkurencyjnych rynkach. Omówione metody służą do analizy makrootoczenia, otoczenia konkurencyjnego, a także sytuacji wewnętrznej przedsiębiorstwa. Autorki szczegółowo przedstawiły analizę SWOT, umożliwiającą zbadanie wnętrza przedsiębiorstwa i jego otoczenia konkurencyjnego.

Książkę wzbogacają liczne przykłady zastosowania prezentowanych metod w praktyce oraz zestawy ćwiczeń uczące samodzielnego ich stosowania.

Książka jest przeznaczona dla studentów kierunków ekonomicznych w wyższych uczelniach różnych typów, uczestników kursów i szkoleń doskonalących umiejętności menedżerskie, a także obecnych i przyszłych menedżerów.

[www.pwe.com.pl](http://www.pwe.com.pl)