



## Algorytm optymalnego sterowania wyrzutnią przeciwlotniczych pocisków raketowych na pokładzie okrętu\*

Zbigniew KORUBA, Zbigniew DZIOPA

*Politechnika Świętokrzyska, Al. 1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiony jest algorytm optymalnego sterowania wyrzutnią przeciwlotniczych pocisków raketowych umieszczoną na poruszającym się okręcie. Model matematyczny ruchu wyrzutni jest linearyzowany, a następnie, wykorzystując macierze stanu i sterowania, wyznaczane jest sterowanie optymalne ze względu na minimum funkcjonału średniokwadratowego. Wyznaczone w ten sposób sterowanie działając na wyrzutnię, zapewnia minimalizację uchybu między ruchem zadany a rzeczywistym oraz podczas procesu poszukiwania i śledzenia celu powietrznego w warunkach oddziaływania zakłóceń zewnętrznych ze strony okrętu.

**Słowa kluczowe:** mechanika, optymalne sterowanie, wyrzutnia okrętowa, pokład okrętu, przeciwlotniczy pocisk raketowy

### 1. WSTĘP

Obiektem rozważań w niniejszym artykule jest sterowana wyrzutnia przeciwlotniczych pocisków raketowych umieszczona na pokładzie okrętu poruszającego się podczas flauty lub pokonującego fale wzburzonego morza [3, 5]. W pierwszym przypadku przyczyną zaburzeń generowanych w układzie jest proces sterowania wyrzutnią zmierzający do przechwycenia celu oraz start pocisku z wyrzutni, natomiast w drugim przypadku na układ działa dodatkowo

\* Artykuł był prezentowany na IX Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 25-28 września 2012 r.

wymuszenie wynikające z warunków panujących na morzu. Możliwość sterowania wyrzutnią oraz wystrzelenia pocisku nie tylko podczas flauty, ale również w czasie pokonywania fal pozwala na obronę przeciwlotniczą w przypadku zaskoczenia przez przeciwnika w warunkach sztormowej pogody.

Sterowanie wyrzutnią w fazie przedstartowej składa się z dwóch etapów [1, 7]:

- poszukiwanie, wykrycie i przechwycenie celu
- identyfikacja i śledzenie celu.

Faza ta realizowana jest od chwili włączenia i wykrycia celu przez układ skanowania przestrzeni do chwili uruchomienia silnika startowego pocisku raketowego. Zjawiska towarzyszące procesowi sterowania wyrzutnią w fazie przedstartowej mogą mieć istotny wpływ na zachowanie się pocisku raketowego podczas startu. Generowane początkowe parametry lotu mogą decydować o realizowanej przez pocisk raketowy trajektorii i w konsekwencji o zniszczeniu celu. Z tego powodu badania w niniejszym artykule koncentrują się na opracowaniu algorytmu optymalnego sterowania wyrzutnią zapewniającego minimum uchybu między jej ruchem zadany a rzeczywistym.

## 2. ZLINEARYZOWANY MODEL MATEMATYCZNY STEROWANEJ WYRZUTNI

Zlinearyzowane równania ruchu wyrzutni posadowionej na okręcie (pełny jej model jest opisany w pracy [2]) w postaci wektorowo-macierzowej przedstawiają się następująco:

$$\dot{\mathbf{x}}_w = \mathbf{A}_w \mathbf{x}_w + \mathbf{B}_w \mathbf{u}_w \quad (1)$$

gdzie:

$\mathbf{x}_w$  – wektor zmiennych stanu wyrzutni, przy czym:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_w &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_{17} \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{16}]^T; \\ x_1 &= x_w; \ x_2 = \dot{x}_w; \ x_3 = y_w; \ x_4 = \dot{y}_w; \ x_5 = z_w; \ x_6 = \dot{z}_w; \ x_7 = \psi; \ x_8 = \dot{\psi}; \\ x_9 &= \vartheta; \ x_{10} = \dot{\vartheta}; \ x_{11} = \phi; \ x_{12} = \dot{\phi}; \ x_{13} = z_w; \ x_{14} = \dot{z}_w; \ x_{15} = \vartheta_w; \ x_{16} = \dot{\vartheta}_w; \end{aligned}$$

$\mathbf{A}_w$  – macierz stanu wyrzutni, której elementy mają następującą postać:

$$a_{1,1} = 0; \ a_{1,2} = 1; \ a_{1,3} = 0; \ a_{1,4} = 0; \ a_{1,5} = 0; \ a_{1,6} = 0; \ a_{1,7} = 0; \ a_{1,8} = 0;$$

$$a_{1,9} = 0; \ a_{1,10} = 0; \ a_{1,11} = 0; \ a_{1,12} = 0; \ a_{1,13} = 0; \ a_{1,14} = 0; \ a_{1,15} = 0; \ a_{1,16} = 0;$$

$$a_{2,1} = -\frac{k_{21} + k_{22} + k_{23} + k_{24}}{m}; \ a_{2,2} = -\frac{c_{21} + c_{22} + c_{23} + c_{24}}{m};$$

$$\begin{aligned}
 & a_{2,3} = 0; a_{2,4} = 0; a_{2,5} = 0; a_{2,6} = 0; a_{2,7} = -\frac{(k_{21} + k_{23})d_1 + (k_{22} + k_{24})d_2}{m}; \\
 & a_{2,8} = -\frac{(c_{21} + c_{23})d_1 + (c_{22} + c_{24})d_2}{m}; a_{2,9} = -\frac{k_{21} + k_{22} + k_{23} + k_{24}}{m} h_1; \\
 & a_{2,10} = -\frac{c_{21} + c_{22} + c_{23} + c_{24}}{m} d_1; a_{2,11} = 0; a_{2,12} = 0; a_{2,13} = 0; a_{2,14} = 0; \\
 & a_{2,15} = 0; a_{2,16} = 0; a_{3,1} = 0; a_{3,2} = 0; a_{3,3} = 0; a_{3,4} = 1; a_{3,5} = 0; a_{3,6} = 0; \\
 & a_{3,7} = 0; a_{3,8} = 0; a_{3,9} = 0; a_{3,10} = 0; a_{3,11} = 0; a_{3,12} = 0; a_{3,13} = 0; a_{3,14} = 0; \\
 & a_{3,15} = 0; a_{3,16} = 0; a_{4,1} = 0; a_{4,2} = 0; a_{4,3} = -\frac{k_{11} + k_{12} + k_{13} + k_{14}}{m}; \\
 & a_{4,4} = -\frac{c_{11} + c_{12} + c_{13} + c_{14}}{m}; a_{4,5} = 0; a_{4,6} = 0; a_{4,7} = 0; a_{4,8} = 0; \\
 & a_{4,9} = \frac{(k_{13} + k_{14})l_2 - (k_{11} + k_{12})l_1}{m}; a_{4,10} = \frac{(c_{13} + c_{14})l_2 - (c_{11} + c_{12})l_1}{m}; \\
 & a_{4,11} = \frac{(k_{11} + k_{13})d_1 + (k_{12} - k_{14})d_2}{m}; a_{4,12} = -\frac{(c_{11} + c_{13})d_1 + (c_{14} - c_{12})d_2}{m}; \\
 & a_{4,13} = 0; a_{4,14} = 0; a_{4,15} = 0; a_{4,16} = 0; a_{5,1} = 0; a_{5,2} = 0; a_{5,3} = 0; a_{5,4} = 0; \\
 & a_{5,5} = 0; a_{5,6} = 1; a_{5,7} = 0; a_{5,8} = 0; a_{5,9} = 0; a_{5,10} = 0; a_{5,11} = 0; a_{5,12} = 0; \\
 & a_{5,13} = 0; a_{5,14} = 0; a_{5,15} = 0; a_{5,16} = 0; a_{6,1} = 0; a_{6,2} = 0; a_{6,3} = 0; a_{6,4} = 0; \\
 & a_{6,5} = -\frac{k_{31} + k_{32} + k_{33} + k_{34}}{m}; a_{6,6} = -\frac{c_{31} + c_{32} + c_{33} + c_{34}}{m}; \\
 & a_{6,7} = \frac{(k_{31} + k_{32})l_1 - (k_{33} + k_{34})l_2}{m}; a_{6,8} = \frac{(c_{31} + c_{32})l_1 - (c_{33} - c_{34})l_2}{m}; \\
 & a_{6,9} = 0; a_{6,10} = 0; a_{6,11} = \frac{k_{31} + k_{32} + k_{33} + k_{34}}{m} h_1; a_{6,12} = \frac{c_{31} + c_{32} + c_{33} + c_{34}}{m} h_1; \\
 & a_{6,13} = 0; a_{6,14} = 0; a_{6,15} = 0; a_{6,16} = 0; a_{7,1} = 0; a_{7,2} = 0; a_{7,3} = 0; a_{7,4} = 0; \\
 & a_{7,5} = 0; a_{7,6} = 0; a_{7,7} = 0; a_{7,8} = 1; a_{7,9} = 0; a_{7,10} = 0; a_{7,11} = 0; a_{7,12} = 0; \\
 & a_{7,13} = 0; a_{7,14} = 0; a_{7,15} = 0; a_{7,16} = 0; a_{8,1} = \frac{(k_{22} + k_{24})d_2 - (k_{21} + k_{23})d_1}{I_y}; \\
 & a_{8,2} = \frac{(c_{22} + c_{24})d_2 - (c_{21} + c_{23})d_1}{I_y}; a_{8,3} = 0; a_{8,4} = 0; \\
 & a_{8,5} = \frac{(k_{31} + k_{32})l_1 - (k_{33} + k_{34})l_2}{I_y}; a_{8,6} = \frac{(c_{31} + c_{12})l_1 - (c_{33} + c_{34})l_2}{I_y};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{8,7} &= -\frac{(k_{21} + k_{23})d_1^2 + (k_{22} + k_{24})d_2^2 + (k_{31} + k_{32})l_1^2 + (k_{33} + k_{34})l_2^2}{I_y}; \\
a_{8,8} &= -\frac{(c_{21} + c_{23})d_1^2 + (c_{22} + c_{24})d_2^2 + (c_{31} + c_{32})l_1^2 + (c_{33} + c_{34})l_2^2}{I_y}; \\
a_{8,9} &= \frac{(k_{22} + k_{24})d_2 - (k_{21} + k_{23})d_1}{I_y}; \quad a_{8,10} = \frac{(c_{22} + c_{24})d_2 - (c_{21} + c_{23})d_1}{I_y} h_1; \\
a_{8,11} &= -\frac{(k_{31} + k_{32})l_1 - (k_{33} + k_{34})l_2}{I_y} h_1; \quad a_{8,12} = -\frac{(c_{31} + c_{32})l_1 - (c_{33} + c_{34})l_2}{I_y} h_1 \\
a_{8,13} &= 0; \quad a_{8,14} = \frac{\eta_{wp}}{I_y}; \quad a_{8,15} = 0; \quad a_{8,16} = 0; \\
a_{9,1} &= 0; \quad a_{9,2} = 0; \quad a_{9,3} = 0; \quad a_{9,4} = 0; \quad a_{9,5} = 0; \quad a_{9,6} = 0; \quad a_{9,7} = 0; \quad a_{9,8} = 0; \\
a_{9,9} &= 0; \quad a_{9,10} = 1; \quad a_{9,11} = 0; \quad a_{9,12} = 0; \quad a_{9,13} = 0; \quad a_{9,14} = 0; \quad a_{9,15} = 0; \quad a_{9,16} = 0; \\
a_{10,1} &= -\frac{k_{21} + k_{22} + k_{23} + k_{24}}{I_z} h_1; \quad a_{10,2} = -\frac{c_{21} + c_{22} + c_{23} + c_{24}}{I_z} h_1; \\
a_{10,3} &= -\frac{(k_{11} + k_{12})l_1 - k_{13}l_2}{I_z}; \quad a_{10,4} = \frac{(c_{13} + c_{14})l_2 - (c_{11} + c_{12})l_1}{I_z}; \quad a_{10,5} = 0; \\
a_{10,6} &= 0; \\
a_{10,7} &= \frac{(k_{22} + k_{24})d_2 - (k_{21} + k_{23})d_1}{I_z} h_1; \quad a_{10,8} = -\frac{(c_{21} + c_{23})d_1 - (c_{22} + c_{24})d_2}{I_y} h_1; \\
a_{10,9} &= -\frac{(k_{21} + k_{22} + k_{23} + k_{24})h_1^2 + (k_{11} + k_{12})l_1^2 + k_{13}l_2^2}{I_z}; \\
a_{10,10} &= -\frac{(c_{21} + c_{22} + c_{23} + c_{24})h_1^2 + (c_{11} + c_{12})l_1^2 + (c_{13} + c_{14})l_2^2}{I_z}; \\
a_{10,11} &= \frac{(k_{11}d_1 + k_{12}d_2)l_1 - k_{13}l_2d_1}{I_z}; \quad a_{10,12} = \frac{(c_{11}d_1 + c_{12}d_2)l_1 + (c_{14}d_2 - c_{13}d_1)l_2}{I_z}; \\
a_{10,13} &= 0; \quad a_{10,14} = 0; \quad a_{10,15} = 0; \quad a_{10,16} = \frac{\eta_{wt}}{I_z}; \\
a_{11,1} &= 0; \quad a_{11,2} = 0; \quad a_{11,3} = 0; \quad a_{11,4} = 0; \quad a_{11,5} = 0; \quad a_{11,6} = 0; \quad a_{11,7} = 0; \\
a_{11,8} &= 0; \\
a_{11,9} &= 0; \quad a_{11,10} = 0; \quad a_{11,11} = 0; \quad a_{11,12} = 1; \quad a_{11,13} = 0; \quad a_{11,14} = 0; \quad a_{11,15} = 0; \\
a_{11,16} &= 0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{12,1} &= 0; \quad a_{12,2} = 0; \quad a_{12,3} = \frac{(k_{11} + k_{13})d_1 - (k_{12} + k_{14})d_2}{I_x}; \\
 a_{12,4} &= \frac{(c_{11} + c_{13})d_1 - (c_{12} + c_{14})d_2}{I_x}; \quad a_{12,5} = \frac{k_{31} + k_{32} + k_{33} + k_{34}}{I_x} h_1; \\
 a_{12,6} &= \frac{c_{31} + c_{32} + c_{33} + c_{34}}{I_z} h_1; \quad a_{12,7} = \frac{(k_{33} + k_{34})l_2 - (k_{31} + k_{32})l_1}{I_x} h_1; \\
 a_{12,8} &= \frac{(c_{33} + c_{34})l_2 - (c_{31} + c_{32})l_1}{I_x} h_1; \quad a_{12,9} = \frac{(k_{11}l_1 - k_{13}l_2)d_1 + (k_{14}l_2 - k_{12}l_1)d_2}{I_x}; \\
 a_{12,10} &= \frac{(c_{11}d_1 - c_{12}d_2)l_1 + (c_{14}d_2 - c_{13}d_1)l_2}{I_x}; \\
 a_{12,11} &= -\frac{(k_{31} + k_{32} + k_{33} + k_{34})h_1^2 + (k_{11} + k_{13})d_1^2 + (k_{14} - k_{12})d_2^2}{I_x}; \\
 a_{12,12} &= -\frac{(c_{31} + c_{32} + c_{33} + c_{34})h_1^2 + (c_{11} + c_{13})d_1^2 + (c_{12} - c_{14})d_2^2}{I_x}; \\
 a_{12,13} &= 0; \quad a_{12,14} = 0; \quad a_{12,15} = 0; \quad a_{12,16} = 0; \quad a_{13,1} = 0; \quad a_{13,2} = 0; \quad a_{13,3} = 0; \\
 a_{13,4} &= 0; \quad a_{13,5} = 0; \quad a_{13,6} = 0; \quad a_{13,7} = 0; \quad a_{13,8} = 0; \quad a_{13,9} = 0; \quad a_{13,10} = 0; \\
 a_{13,11} &= 0; \quad a_{13,12} = 0; \quad a_{13,13} = 0; \quad a_{13,14} = 1; \quad a_{13,15} = 0; \quad a_{13,16} = 0; \quad a_{14,1} = 0; \\
 a_{14,2} &= 0; \quad a_{14,3} = 0; \quad a_{14,4} = 0; \quad a_{14,5} = 0; \quad a_{14,6} = 0; \quad a_{14,7} = 0; \quad a_{14,8} = 0; \\
 a_{14,9} &= 0; \quad a_{14,10} = 0; \quad a_{14,11} = 0; \quad a_{14,12} = 0; \quad a_{14,13} = 0; \quad a_{14,14} = -\frac{\eta_{wp}}{I_y}; \quad a_{14,15} = 0; \\
 a_{14,16} &= 0; \quad a_{15,1} = 0; \quad a_{15,2} = 0; \quad a_{15,3} = 0; \quad a_{15,4} = 0; \quad a_{15,5} = 0; \quad a_{15,6} = 0; \\
 a_{15,7} &= 0; \quad a_{15,8} = 0; \quad a_{15,9} = 0; \quad a_{15,10} = 0; \quad a_{15,11} = 0; \quad a_{15,12} = 0; \quad a_{15,13} = 0; \\
 a_{15,14} &= 0; \quad a_{15,15} = 0; \quad a_{15,16} = 1; \quad a_{16,1} = 0; \quad a_{16,2} = 0; \quad a_{16,3} = 0; \quad a_{16,4} = 0; \\
 a_{16,5} &= 0; \quad a_{16,6} = 0; \quad a_{16,7} = 0; \quad a_{16,8} = 0; \quad a_{16,9} = 0; \quad a_{16,10} = 0; \quad a_{16,11} = 0; \\
 a_{16,12} &= 0; \quad a_{16,13} = 0; \quad a_{16,14} = 0; \quad a_{16,15} = 0; \quad a_{16,16} = -\frac{\eta_{wt}}{I_z}.
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} 0 & 1/m_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/m_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/m_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/I_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/I_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/I_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/I_z \end{bmatrix}^T$$

Wszystkie wielkości występujące w elementach macierzy A i B (parametry wyrzutni) zostały opisane w pracach [2, 5] i dlatego nie będą tutaj przytaczane.

### 3. ALGORYTM OPTIMALNEGO STEROWANIA WYRZUTNIĄ

Uproszczony schemat algorytmu wyznaczania optymalnego sterowania okrętową wyrzutnią przeciwnocnych pocisków raketowych przedstawiony jest na rysunku 1.

Prawo sterowania dla wyrzutni określamy za pomocą metody optymalizacji liniowo-kwadratowej [4] z funkcjonałem w postaci

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}_w^T \mathbf{Q}_w \mathbf{x}_w + \mathbf{u}_w^T \mathbf{R}_w \mathbf{u}_w) dt \quad (2)$$

Przedstawmy to prawo w następującej postaci [4]

$$\mathbf{u}_w = -\mathbf{K}_w \cdot \mathbf{x}_w \quad (3)$$

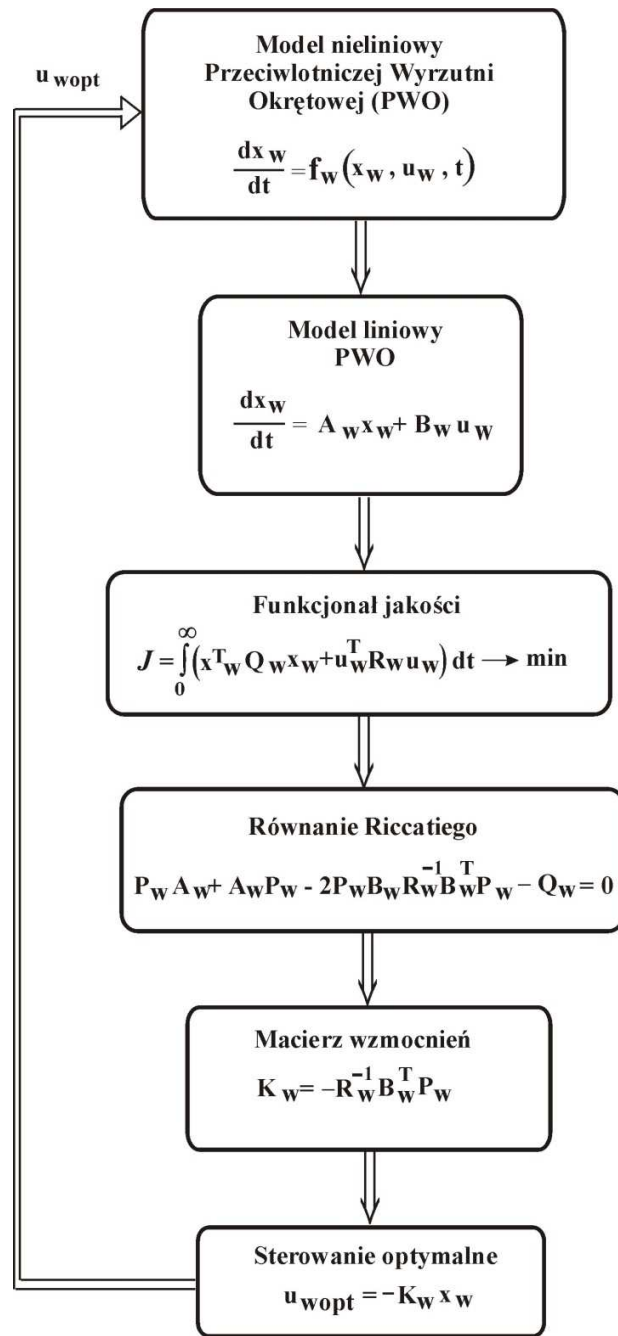
gdzie:

$$\mathbf{u}_w = [M_x \quad M_y \quad M_z \quad M_\psi \quad M_\vartheta \quad M_\phi \quad M_w \quad M_p]^T$$

$M_x, M_y, M_z$  – sterowania korekcyjne przemieszczeń podłużnych wyrzutni wzdłuż osi podłużnej, bocznej i pionowej, odpowiednio;

$M_\psi, M_\vartheta, M_\phi$  – sterowania korekcyjne przemieszczeń kątowych wyrzutni wzdłuż osi podłużnej, bocznej i pionowej, odpowiednio;

$M_w, M_p$  – sterowania wieży i prowadnicy wyrzutni.



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu sterowania przeciwlotniczą wyrzutnią okrętową

Fig. 1. Block diagram of the control algorithm of anti-aircraft rocket ship

Macierz sprzężenia  $\mathbf{K}_w$  występująca w równaniu (2) wyznaczana jest z następującej zależności

$$\mathbf{K}_w = \mathbf{R}_w^{-1} \cdot \mathbf{B}_w^T \cdot \mathbf{P}_w \quad (4)$$

Macierz  $\mathbf{P}_w$  jest rozwiązaniem algebraicznego równania Riccatiego

$$\mathbf{A}_w^T \mathbf{P}_w + \mathbf{P}_w \mathbf{A}_w - 2\mathbf{P}_w \mathbf{B}_w \mathbf{R}_w^{-1} \mathbf{B}_w^T \mathbf{P}_w + \mathbf{Q}_w = \mathbf{0} \quad (5)$$

Występujące w równaniach (2), (4) i (5) macierze wag  $\mathbf{R}_w$  i  $\mathbf{Q}_w$  sprowadzone do postaci diagonalnej, dobierane są eksperymentalnie, przy czym poszukiwania rozpoczynane są od wartości równych [6]:

$$q_{ii} = \frac{1}{2x_{wi_{\max}}}, \quad r_{ii} = \frac{1}{2u_{wi_{\max}}}, \quad (i = 1, 2, \dots, 16) \quad (6)$$

gdzie:

- $x_{wi_{\max}}$  – maksymalny zakres zmian  $i$ -tej wartości zmiennej stanu,
- $u_{wi_{\max}}$  – maksymalny zakres zmian  $i$ -tej wartości zmiennej sterującej.

#### 4. WNIOSKI

Zaprezentowany w pracy algorytm optymalnego sterowania wyrzutnią pozwala nie tylko na możliwie najszybsze jej ustawienie w pożądanym miejscu przestrzeni (oś podłużna wyrzutni ustawiona zgodnie z linią obserwacji celu), ale także zapewnia minimalizację efektów dynamicznych i tłumienie procesów przejściowych w najkrótszym czasie.

Należy zwrócić uwagę, że zaproponowany algorytm oprócz minimalizacji uchybów między ruchem zadany a rzeczywistym sterowanej wyrzutni pozwala dobierać współczynniki wzmocnień regulatora, aby nie przekroczyć dopuszczalnych wartości momentów sterujących, przez co zapewniona jest techniczna realizowalność.

Następnym etapem badań będzie przeprowadzenie symulacji komputerowej sterowania wyrzutnią z wykorzystaniem przedstawionego w niniejszej pracy optymalnego układu sterowania.

*Artykuł zawiera wyniki pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2011-2013 jako projekt badawczy.*



## LITERATURA

- [1] Cochran J.E., Foster W.A., *Dynamics of Flexible Missile/Launcher Systems*, Technical Papers, American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 358-366, 1992.
- [2] Dziopa Z., Koruba Z., Modelling and the elements of controlled dynamics of the anti-aircraft missile launcher based on board the warship, *Solid State Phenomena*, vol. 180, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 269-280, 2012.
- [3] Dziopa Z., Koruba Z., Krzysztofik I., Elementy metody formułowania modelu wyrzutni raketowej umieszczonej na pokładzie okrętu, *Materiały konferencji „Kierowanie ogniem systemów obrony powietrznej (przeciwlotniczej)”*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2010, s. 85-94, 2010.
- [4] Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R., *Podstawy teorii sterowania*, WNT, Warszawa, 2006.
- [5] Koruba Z., Uproszczona analiza dynamiki startu pocisku raketowego z wyrzutni posadowionej na pokładzie okrętu, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, nr 185A, s. 249-256, 2011.
- [6] Koruba Z., Osiecki J.W., *Budowa, dynamika i nawigacja wybranych broni precyzyjnego rażenia*, podręcznik akademicki, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, s. 484, Kielce, 2006.
- [7] Светлицкий В.А., *Динамика старта летательных аппаратов*. Наука, Москва, 1963.

## The Algorithm of Optimal Control of the Anti-Aircraft Launcher on Board a Ship

Zbigniew KORUBA, Zbigniew DZIOPA

**Abstract.** The paper presents the algorithm of optimal control of the anti-aircraft launcher mounted on board a moving ship. The mathematical model of the launcher motion is linearised, and then, using the matrix of state and control, the optimal control is determined on account of the minimum functional mean-square. This way of determining control which affects the launcher, ensures minimization of the deviation between the applied and actual motion while searching and tracing the aerial target under the condition of external disturbances generated by the ship.

**Keywords:** mechanics, optimal control, anti-aircraft launcher, board of a moving ship, anti-aircraft missile

