

Zbigniew KORUBA¹
Daniel GAPIŃSKI²
Piotr SZMIDT³

ANALIZA MOŻLIWOŚCI STEROWANIA SAMONAPROWADZAJĄCĄ GŁOWICĄ SKANUJĄCO-ŚLEDZĄCĄ POSADOWIONĄ NA MOBILNYM ZESTAWIE ARTYLERYJSKO-RAKJETOWYM

Na współczesnym polu walki istnieje potrzeba ustawicznego zwiększania zdolności bojowych, w tym prędkości działania, zasięgu wykrywania celów, możliwości identyfikacji celów i skuteczności prowadzenia ognia przez zestawy artyleryjsko-rakietowe krótkiego zasięgu. Dużym wyzwaniem jest możliwość skutecznego prowadzenia ognia przez tego typu zestawy w warunkach oddziaływania zakłóceń nie tylko od strony namierzanych środków napadu powietrznego, lecz także ze strony poruszającej się platformy, na której jest posadowiony zestaw artyleryjsko-rakietowy wraz z samonaprowadzającymi się pociskami rakietowymi. W pracy przedstawiono analizę możliwości sterowania innowacyjną głowicą skanująco-śledzącą wchodzącą w skład pocisków rakietowcy i przeznaczoną do wykrywania oraz śledzenia wymienionych obiektów. Niektóre wyniki badań symulacji numerycznych przedstawiono w postaci graficznej.

Słowa kluczowe: głowica IR, sterowanie, wykrywanie i śledzenie celów powietrznych, układ giroskopowy, samonaprowadzanie

1. Wprowadzenie

Tematyka artykułu nawiązuje do szerszych badań prowadzonych nad zaprojektowaną optyczną głowicą skanująco-śledzącą przeznaczoną do przeciwlotniczych pocisków rakietowych bliskiego zasięgu [1-4]. Proces przeszukiwania przestrzeni powietrznej przez głowicę odbywa się automatycznie tzw. metodą pasywną, dzięki czemu cel nie jest w stanie wykryć faktu jego namierzania. Ze względu na nieustannie rosnące wymagania stawiane środkom napadu powietrznego [5, 6] rosną również wymagania dotyczące samonaprowadzających się

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Zbigniew Koruba, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, al. 1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce, tel.: 41 3424433, e-mail: ksmzko@tu.kielce.pl

² Daniel Gapiński, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, e-mail: tu_daniel_kielce@wp.pl

³ Piotr Szmidt, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, e-mail: pschmidt@tu.kielce.pl

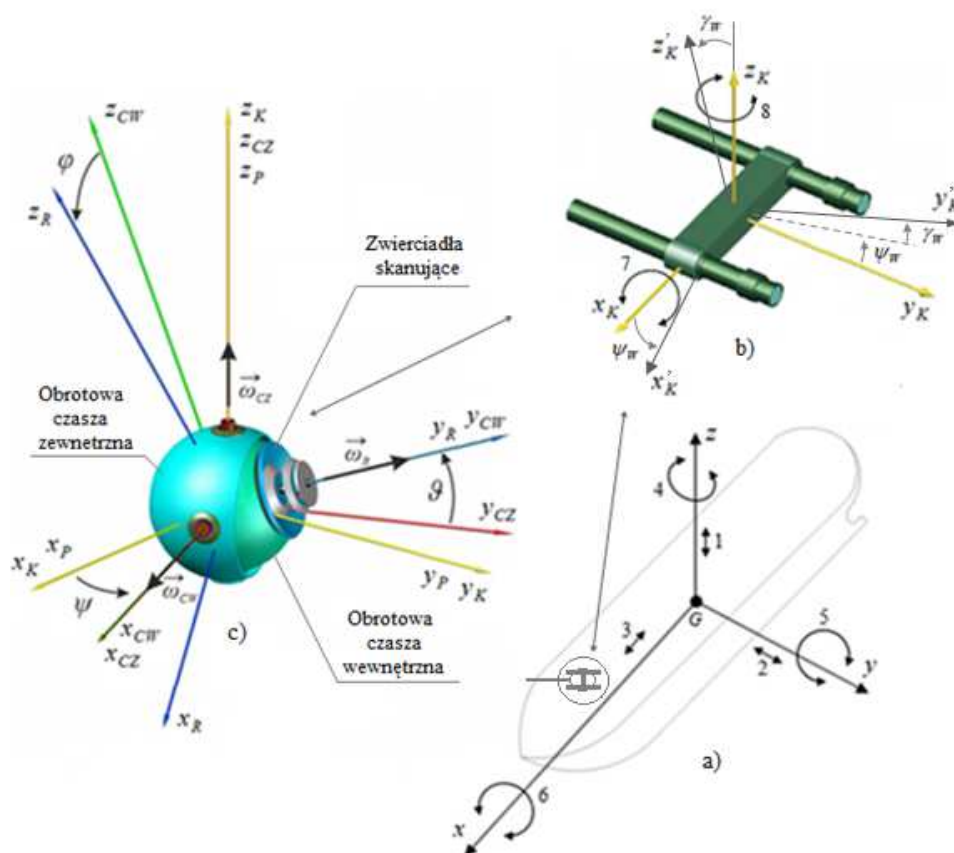
pocisków raketowych bliskiego zasięgu, wśród których można wymienić zwiększenie prędkości lotu, poprawę manewrowości czy uniwersalność zastosowania, automatycznie zwiększają się też wymagania dotyczące głowic wykrywająco-śledzących. Wraz ze zmianą wymienionych parametrów pocisków raketowych wzrastają przeciążenia, jakim jest poddawana głowica samonaprowadzająca. Jeszcze przed startem pocisku raketowego, w fazie tzw. przeszukiwania przestrzeni powietrznej przez głowicę, mogą występować niekorzystne warunki wynikające z przemieszczeń kątowych samej wyrzutni raketowej, która w analizowanym przypadku jest zlokalizowana na zmodyfikowanym zestawie artyleryjsko-raketowym posadowionym na pokładzie kołyszącego się na morzu okrętu Marynarki Wojennej [7, 8]. Celem prezentowanych w artykule badań naukowych było zbadanie możliwości sterowania głowicą podczas oddziaływania na nią niekorzystnych zakłóceń pochodzących od ruchu okrętu na fali morskiej przy jednoczesnym ruchu samego zestawu artyleryjskiego.

2. Model matematyczny

Wizualizację 3D zaprojektowanej, optoelektronicznej głowicy skanująco-śledzącej wraz z przyjętymi do celów jej analizy układami współrzędnych przedstawiono na rys. 1. Do przeprowadzenia analizy mającej na celu zbadanie, jaki wpływ na proces sterowania osią głowicy będą miały zakłócenia pochodzące od ruchu okrętu na fali, przyjęto według pracy [9] model tego zjawiska, klasyfikując ruchy okrętu zgodnie z sześcioma stopniami swobody. Na rysunku 1a przedstawiono główne składowe ruchy oscylacyjnego okrętu na powierzchni morza, a na rys. 1b pokazano podwójną wyrzutnię przeciwlotniczych pocisków raketowych krótkiego zasięgu, która jest zamontowana na zestawie artyleryjsko-raketowym posadowionym na okręcie. Rysunek 1c przedstawia schemat zaprojektowanej głowicy wraz z przyjętymi układami współrzędnych oraz oznaczeniami poszczególnych kątów obrotu odpowiednich układów względem siebie. Przy rozpatrywaniu ruchów okrętu na powierzchni morza przyjęto początek układu współrzędnych $x y z$ związanego ze statkiem w środku jego ciężkości G . Ze względu na analizowane zagadnienie związane z wykrywaniem oraz śledzeniem celów powietrznych, oś z tego układu skierowano ku górze, oś x – w stronę dziobu, natomiast oś y – w stronę lewej burty.

Oznaczone na rys. 1a ruchy okrętu na fali określa się następująco: 1 – nurzanie, 2 – oscylacje poprzeczne, 3 – oscylacje wzdłużne, 4 – myszkowanie, 5 – kiwanie, 6 – kołysanie. Kąt przechyłu boczno-okrętu spowodowany jego kołysaniem został oznaczony jako ϕ_x , kąt przechyłu wzdłużnego okrętu spowodowany myszkowaniem oznaczono jako ϕ_z , natomiast przegłębienie okrętu, będące wynikiem kiwania, oznaczono symbolem ϕ_y . Założono, że wyrzutnia raketowa jest sprzężona na stałe z ruchomym członem zestawu artyleryjsko-raketowego i wykonuje dodatkowe ruchy kątowe w płaszczyźnie poziomej (azymucie), oznaczone na rys. 1b numerem 7 oraz w płaszczyźnie pionowej (elewacji) – oznaczone

numerem 8. Przyjęto oznaczenie kąta obrotu wyrzutni w azymucie jako ψ_w oraz w elewacji jako γ_w .



Rys. 1. Model 3D zaprojektowanej głowicy skanująco-śledzącej wraz z przyjętymi układami współrzędnych: a) okręt z posadowionym zestawem artyleryjsko-rakietowym, b) wyrzutnia raketowa, c) głowica samonaprowadzająca

Fig. 1. The 3D model of the designed scanning and tracking head with the adopted coordinate systems: a) a ship with a set of artillery-rocket, b) a rocket launcher, c) a self-guiding warhead

Prawo skanowania przestrzeni powietrznej przez układ optoelektroniczny głowicy przedstawiono w pracy [10]. Zapisuje się je w następujący sposób:

$$\beta_x(t) = a \tan(\tan(\beta(t)) \cdot \cos(a \sin(z_{zp}(t) / \sqrt{x_{zp}(t)^2 + z_{zp}(t)^2}))) \quad (1)$$

$$\beta_z(t) = a \tan(\tan(\beta(t)) \cdot \sin(a \sin(z_{zp}(t) / \sqrt{x_{zp}(t)^2 + z_{zp}(t)^2}))) \quad (2)$$

gdzie: $\beta_x(t)$, $\beta_z(t)$ – współrzędne kątowne wykrytego celu względem osi głowicy skanującej,
 $\beta(t)$ – kąt odgięcia promienia świetlnego od osi optycznej głowicy,
 x_{zp} , z_{zp} – składowe położenia promienia świetlnego na płaszczyźnie zwierciadła pierwotnego.

Oś optyczna głowicy jest wprawiana w zadany ruch pod wpływem momentów sił zewnętrznych M_Z i M_W , generowanych przez silniki sterujące znajdujące się w poszczególnych czaszach sterujących. Wartości zadanych momentów sterujących muszą uwzględniać kompensację zarówno wymienionych zakłóceń, jak i kompensację momentów wywołanych siłami bezwładności pochodzącymi od przeciążeń, jakich doznaje pocisk raketowy podczas fazy startu oraz fazy lotu. Analizę możliwości kompensacji tych ostatnich przeprowadzono w pracach [11-13].

Wymienione wymuszenia tworzą wypadkowe ruchy kątowne korpusu pocisku, w którym jest zamontowana głowica i są traktowane jak zakłócenia zewnętrzne określone za pomocą prędkości kątownych: ω_{x_p} , ω_{y_p} , ω_{z_p} , powodujących obrót korpusu wokół poszczególnych osi układu x_p , y_p , z_p o odpowiednie kąty α_x , α_y , α_z .

Wprowadzono następujące układy współrzędnych (rys. 2.):

x y z – układ współrzędnych związany z okrętem,
 x_K y_K z_K – układ współrzędnych związany z wyrzutnią raketową, określający w przestrzeni kierunek odniesienia dla głowicy,
 x_R y_R z_R – ruchomy układ współrzędnych związany z rotorem głowicy,
 x_{CW} y_{CW} z_{CW} – ruchomy układ współrzędnych związany z czaszą wewnętrzną,
 x_{CZ} y_{CZ} z_{CZ} – ruchomy układ współrzędnych związany z czaszą zewnętrzną,
 x_P y_P z_P – ruchomy układ współrzędnych związany z pociskiem.

Przyjęto następujące oznaczenia kątów obrotu:

ϕ_x – kąt przechyłu bocznego okrętu spowodowany jego kołysaniem,
 ϕ_y – kąt przegłębienia okrętu, będący wynikiem jego ruchów kiwania,
 ϕ_z – kąt przechyłu wzdłużnego okrętu spowodowany myszkowaniem,
 ψ_w , γ_w – kąty obrotu wyrzutni raketowej odpowiednio w azymucie i elewacji,
 ψ – kąt obrotu x_{CZ} y_{CZ} z_{CZ} względem x_K y_K z_K dookoła osi z_{CZ} ,
 ϑ – kąt obrotu x_{CW} y_{CW} z_{CW} względem x_K y_K z_K dookoła osi x_{CW} ,
 φ – kąt obrotu x_R y_R z_R względem x_K y_K z_K dookoła osi y_R ,
 α_x – kąt obrotu x_P y_P z_P względem x_K y_K z_K dookoła osi x_P ,
 α_y – kąt obrotu x_P y_P z_P względem x_K y_K z_K dookoła osi y_P ,
 α_z – kąt obrotu x_P y_P z_P względem x_K y_K z_K dookoła osi z_P .

Położenie osi głowicy względem układu x_K y_K z_K jest więc określone za pomocą trzech kątów: ψ , ϑ , φ . Kąty ψ , ϑ są mierzone czujnikami światłowodo-

wymi, natomiast kąt φ – czujnikiem położenia rotora [14]. Jako wielkości dane przyjęto:

- 1) $J_{x_{CZ}}, J_{y_{CZ}}, J_{z_{CZ}}$ – obliczone momenty bezwładności kompletnej czaszy zewnętrznej,
- 2) $J_{x_{CW}}, J_{y_{CW}}, J_{z_{CW}}$ – obliczone momenty bezwładności kompletnej czaszy wewnętrznej,
- 3) $J_{x_R}, J_{y_R}, J_{z_R}$ – obliczone momenty bezwładności wirnika,
- 4) $\vec{\omega}_P(\omega_{x_P}, \omega_{y_P}, \omega_{z_P})$ – prędkość kątową korpusu pocisku,
- 5) \vec{M}_Z – moment sił oddziaływania silnika sterującego na czaszę zewnętrzną,
- 6) \vec{M}_W – moment sił oddziaływania silnika sterującego na czaszę wewnętrzną,
- 7) $\vec{M}_{TW}, \vec{M}_{TZ}$ – momenty sił tarcia w łożyskach odpowiednio czaszy wewnętrznej i zewnętrznej, przy czym $\vec{M}_{TW} = c_w \dot{\vartheta}$, $\vec{M}_{TZ} = c_z \dot{\psi}$, gdzie c_w, c_z są to współczynniki tarcia w łożyskach odpowiednio czaszy wewnętrznej i zewnętrznej.

Dzięki doborowi odpowiednich materiałów konstrukcyjnych, z których zostaną wykonane poszczególne elementy składowe głowicy i wykonaniu ich modeli 3D uzyskano przedstawione dalej parametry fizyczne urządzenia.

Momenty bezwładności rotora względem osi x_R, y_R, z_R :

$$J_{x_R} = 0,00158446 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_{y_R} = 0,0011405 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \\ J_{z_R} = 0,00158124 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

Momenty bezwładności kompletnej czaszy wewnętrznej względem osi x_{CW}, y_{CW}, z_{CW} :

$$J_{x_{CW}} = 0,00044593 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_{y_{CW}} = 0,00064376 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \\ J_{z_{CW}} = 0,00047213 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

Momenty bezwładności kompletnej czaszy zewnętrznej względem osi x_{CZ}, y_{CZ}, z_{CZ} :

$$J_{x_{CZ}} = 0,00020254 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_{y_{CZ}} = 0,00032367 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \\ J_{z_{CZ}} = 0,00022394 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

Masa głowicy $m_g = 2,25$ kg, współczynnik tarcia w łożysku czaszy wewnętrznej oraz zewnętrznej $c_w = c_z = 0,05$ N·ms, założony maksymalny moment sterujący dla poszczególnych czasz głowicy $M = 1,5$ N·m, prędkość obrotowa rotora: $n = 1050$ rad/s ($\sim 10\,000$ obr./min).

Na podstawie opracowanego modelu fizycznego głowicy, wykorzystując równania Lagrange'a II rodzaju, wyprowadzono równania ruchu osi głowicy [15-19]:

$$\begin{aligned}
 M_Z = & M_{TZ} + J_{zCZ} \frac{d}{dt} \omega_{zCZ} + J_{yCW} \frac{d}{dt} (\omega_{yCW} \sin \vartheta) + \\
 & + J_{zCW} \frac{d}{dt} (\omega_{zCW} \cos \vartheta) + J_{yR} \frac{d}{dt} (\omega_{yR} \sin \vartheta) + \\
 & + J_{zR} \frac{d}{dt} (\omega_{zR} \cos \vartheta) - (J_{xCZ} - J_{yCZ}) \omega_{xCZ} \omega_{yCZ} + \\
 & - (J_{xCW} + J_{xR}) \omega_{xCW} \omega_{yCZ} + J_{yCW} \omega_{yCW} \omega_{xCZ} \cos \vartheta + \\
 & - (J_{zCW} + J_{zR}) \omega_{zCW} \omega_{xCZ} \sin \vartheta + J_{yR} \omega_{yR} \omega_{xCZ} \cos \vartheta
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 M_W = & M_{TW} + J_{xCW} \frac{d}{dt} \omega_{xCW} + J_{xR} \frac{d}{dt} \omega_{xR} + \\
 & + (J_{yCW} - J_{zCW} - J_{zR}) \omega_{yCW} \omega_{zCW} - J_{yR} \omega_{yR} \omega_{zCW}
 \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

- prędkość kątowna rotora głowicy $\omega_{yR} = n$,
- prędkości kątowne czaszy zewnętrznej
 $\omega_{xCZ} = \omega_{xP} \cos \psi + \omega_{yP} \sin \psi$, $\omega_{yCZ} = -\omega_{xP} \sin \psi + \omega_{yP} \cos \psi$,
 $\omega_{zCZ} = \dot{\psi} + \omega_{zP}$,
- prędkości kątowne czaszy wewnętrznej
 $\omega_{xCW} = \omega_{xCZ} + \vartheta$, $\omega_{yCW} = -\omega_{yCZ} \cos \vartheta + \omega_{zCZ} \sin \vartheta$,
 $\omega_{zCW} = -\omega_{yCZ} \sin \vartheta + \omega_{zCZ} \cos \vartheta$.

3. Wyniki badań

Ruchy okrętu na fali są zjawiskiem złożonym, wywołanym między innymi oscylacją swobodnej powierzchni morza, wiatrem, wypornością jednostki pływającej, jej prędkością czy kierunkiem nabiegu fali [20]. Okresy przechyłów swobodnych kadłuba zależą również od przewyższenia środka masy okrętu nad środkiem jego wyporu oraz od wymiarów samego kadłuba. Okresy te maleją wraz z wypornością okrętu, natomiast na wartości kątów przechyłu wpływa również długość i wysokość fali morskiej. Ważne jest zatem określenie zarówno parametrów okrętu, na którym jest zainstalowany zestaw artyleryjsko-rakietowy, jak i stanu morza, przy jakim mogą być prowadzone działania ogniowe. Ze względu

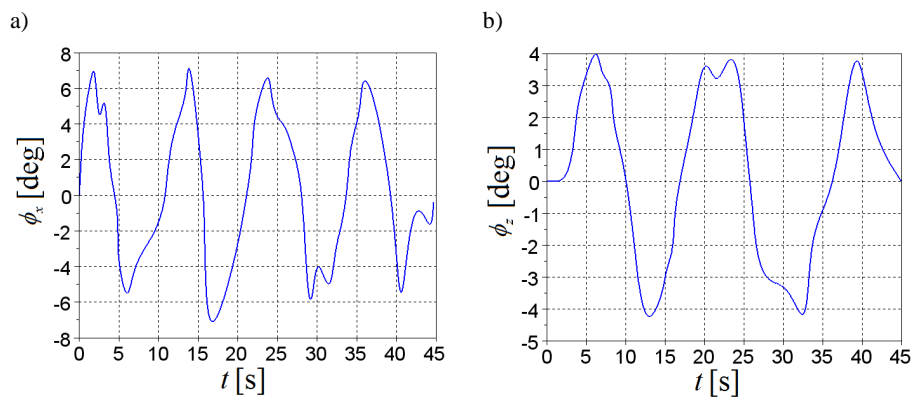
na krytyczne parametry wymuszeń mających wpływ na stabilną pracę głowicy [21] założono, że głowica pracuje na jednostce o niewielkiej wyporności, rzędu 200 t (np. trałowiec proj. 207 M) [22] oraz wykonywanie zadań bojowych odbywa się przy stanie morza do 4 w skali Beauforta. Dla takich założeń określono maksymalne amplitudy przechyłów kadłuba na poziomie $A = 26^\circ$ oraz częstotliwość ich zachodzenia w zakresie $f = 0,125-0,500$ Hz. Przedstawione oscylacyjne ruchy okrętu na fali mają charakter zmienny w czasie, a same ruchy powierzchni swobodnej morza są zjawiskami niestałymi, zachodzącymi nieregularnie i losowo. Przyjmowanie regularnego modelu przechyłów okrętu (np. przez funkcję sinusoidalną) dla takich warunków nie ma większego sensu. Nieregularne modele oscylacji okrętów są opracowywane głównie z wykorzystaniem charakterystyk rozkładu zmiennych losowych, uwzględniających zależności pomiędzy wartościami przechyłów wzdłużnych i burtowych, ich prędkościami oraz przyśpieszeniami w rozpatrywanym przedziale czasowym [23-26]. Wypadkowe zaburzenie w dowolnym punkcie obszaru, do którego docierają różne fale tego samego rodzaju, jest sumą algebraiczną zaburzeń wywołanych w tym punkcie przez każdą falę z osobna, co jest podstawowym założeniem tzw. superpozycji fal. Według przeprowadzonej analizy ustalone zostały maksymalne amplitudy oraz zakresy ich częstotliwości dla oscylacji danego typu okrętu przy założonym stanie morza. Uwzględniając fakt, że wykrycie i śledzenie celu powietrznego przez głowice jest procesem stosunkowo krótkim oraz biorąc pod uwagę losowość oscylacji okrętu na fali, przeprowadzono symulacje komputerowe modelujące wymienione zakłócenia. Wszystkie symulacje zostały wykonane z zastosowaniem własnego oprogramowania napisanego w języku programowania C++. Przykładowe symulacje przedstawiono na rys. 2-4.

Na rysunku 5. zamieszczono przykładowe symulacje przemieszczeń kątowych zestawu artyleryjskiego posadowionego na omawianym okręcie. Dla zamodelowanych wymuszeń zażądano, aby oś głowicy skanująco-śledzącej utrzymywała zadany, programowy ruch po powierzchni stożka kołowego o kącie rozwarcia wynoszącym około 4° .

Sterowanie w układzie zamkniętym wymaga pomiaru „skutków sterowania”, czyli rzeczywistych wartości kątów obrotu poszczególnych czasz OGSS w danej chwili czasu. W zaprojektowanej głowicy pomiar ten jest realizowany za pomocą światłowodowych czujników [14]. Różnice pomiędzy pomierzonym (rzeczywistym) i żądanym, kątowym położeniem poszczególnych czasz będą stanowiły tzw. uchyby cząstkowe:

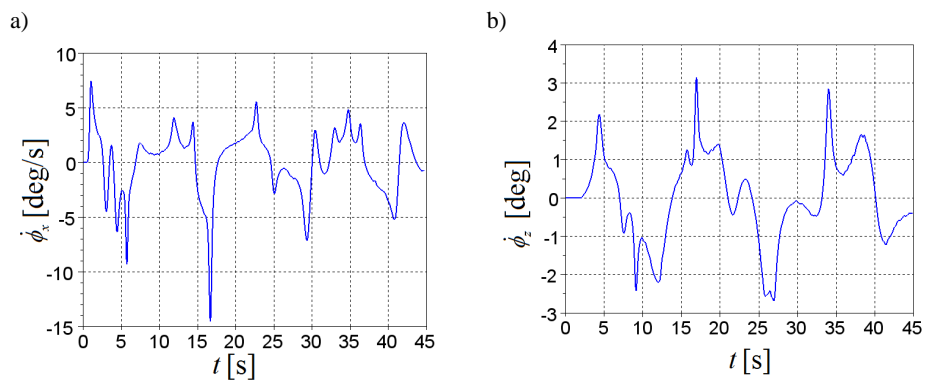
$$\varepsilon_w = \vartheta - \vartheta_z \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \psi - \psi_z \quad (6)$$



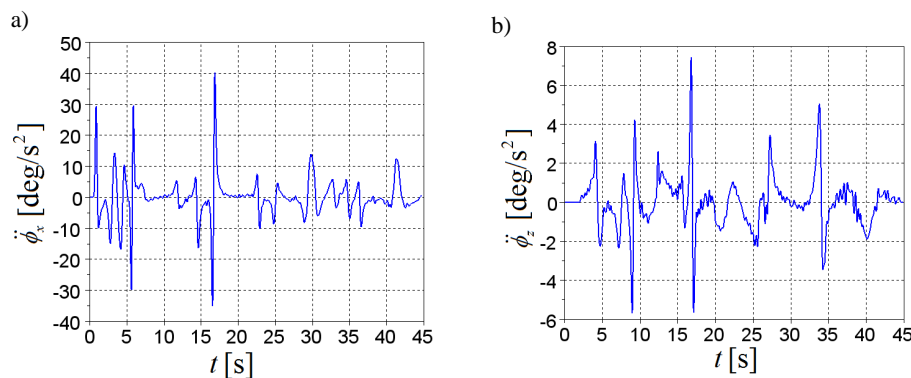
Rys. 2. Kąt przechyłu bocznego okrętu spowodowany jego kołysaniem (a) oraz myszkowaniem (b) dla stanu morza 3B

Fig. 2. The angle of the ship's lateral heel caused by rocking (a) and by yaw (b) for the state of the sea in 3B



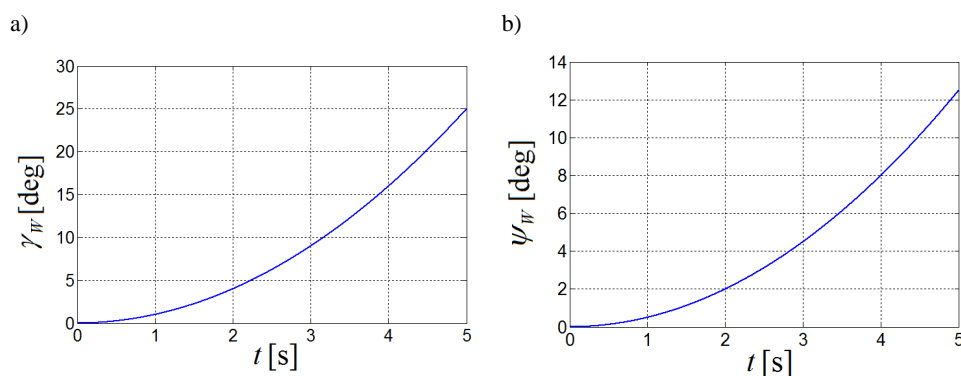
Rys. 3. Prędkość kątowna przechyłu bocznego (a) oraz wzdłużnego (b) okrętu dla przypadku przedstawionego na rys. 2.

Fig. 3. The angular velocity of the lateral (a) and longitudinal (b) angle of the ship for the case shown in Fig. 2



Rys. 4. Przyspieszenie kątowe przechyłu bocznego (a) oraz wzdłużnego (b) okrętu dla przypadku przedstawionego na rys. 2.

Fig. 4. Angular acceleration of the lateral (a) and longitudinal (b) tilt of the ship for the case shown in Fig. 2



Rys. 5. Przemieszczenie kątowe zestawu artyleryjsko-rakietowego w elewacji (a) oraz w azymucie (b)

Fig. 5. Angular displacement of the artillery-rocket set in the facade (a) and in the azimuth (b)

Różnica pomiędzy rzeczywistym i żądanym kątowym położeniem osi głowicy w przestrzeni powietrznej będzie zatem stanowić tzw. uchyb całkowity:

$$\varepsilon_C = \sqrt{(\vartheta - \vartheta_z)^2 + (\psi - \psi_z)^2} \tag{7}$$

W opisanym równaniami (3) i (4) ogólnym prawie sterowania osią głowicy momenty sterujące dla poszczególnych czasz głowicy w fazie sterowania programowego zostaną wyznaczone z zależności [15]:

$$M_w = -k_w(\vartheta - \vartheta_z) + k_z(\psi - \psi_z) - h_z(\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_z) \tag{8}$$

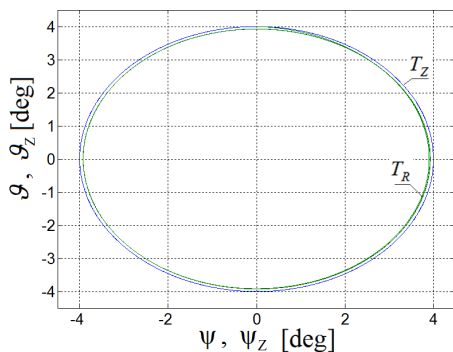
$$M_Z = -k_z(\vartheta - \vartheta_z) - k_w(\psi - \psi_z) - h_z(\dot{\psi} - \dot{\psi}_z) \quad (9)$$

gdzie: k_w, k_z, h_z – dobrane współczynniki regulatora [15-17].

Współczynniki regulatora zostały dobrane według prac [15-17] i przyjmowały następujące wartości:

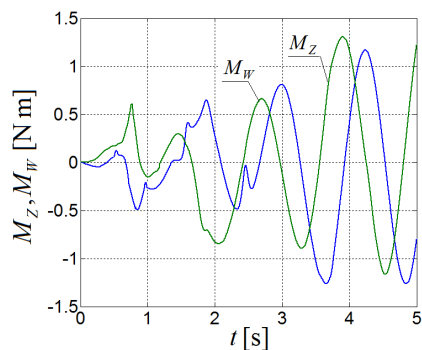
$$k_w = 100, k_z = 1/2 \cdot \sqrt{2 + 4 \cdot k_w}, h_z = \sqrt{2 + 4 \cdot k_w} \quad (10)$$

Symulację komputerową ruchu zadanego oraz realizowanego przez oś głowicy zaprezentowano na rys. 6. Momenty sterujące dla poszczególnych czasz głowicy przedstawiono na rys. 7.



Rys. 6. Trajektoria zadaną i realizowaną przez oś optyczną głowicy

Fig. 6. Trajectory specified and implemented by the optical axis of the head



Rys. 7. Momenty sterujące

Fig. 7. Control moments

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wpływu zakłóceń pochodzących od ruchomego zestawu artyleryjsko-rakietowego umiejscowionego na okręcie poruszającym się na fali dowodzi, że zaprojektowana optyczna głowica skanująco-śledząca będzie w stanie skutecznie wyszukiwać oraz śledzić wykryte cele powietrzne na pokładzie okrętu o niedużej wyporności, rzędu 200 t (np. trałowiec proj. 207 M), przy stanie morza do 3 w skali Beauforta i założeniu maksymalnych prędkości kątowych ruchu poszczególnych członów zestawu artyleryjsko-rakietowego wynoszących 60 deg/s.

Literatura

- [1] Gapiński D., Koruba Z., Krzysztofik I.: The model of dynamics and control of modified optical scanning seeker in anti-aircraft rocket missile, *Mech. System Signal Proces.*, 45 (2014) 433-447.
- [2] Gapiński D., Krzysztofik I., Koruba Z.: Multi-channel, passive, short-range anti-aircraft defence system, *Mech. System Signal Proces.*, 98 (2018) 802-815.
- [3] Gapiński D., Krzysztofik I., Koruba Z.: Analysis of the dynamics and control of the modified optical target seeker used in anti-aircraft rocket missiles, *J. Theor. Applied Mech.*, 52 (2014) 629-639.
- [4] Gapiński D., Szmids P.: The control process of a scanning and tracking IR seeker using inverse dynamics, 23rd Int. Conf. Engineering Mechanics, 2017, pp. 326-329.
- [5] Adamski M.: Obrona samolotów i śmigłowców przed atakiem z ziemi i powietrza, [w:] *Systemy przeciwlotnicze i obrony powietrznej*, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Sprzętu Mechanicznego, Tarnów 2009.
- [6] Kowaleczko G., Wachłaczko M.: Aircraft dynamics during flight in icing conditions, *J. Theor. Applied Mech.*, 50 (2012) 269-284.
- [7] Milewski S., Kobierski J., Chmieliński M.: Trenażery morskich zestawów rakietowo-artyleryjskich, *ZN Akademii Marynarki Wojennej*, 57 (2012) 33-53.
- [8] Żak A.: Ship's hydroacoustics signatures classification, *Arch. Acoustics*, 33 (2008) 85-90.
- [9] Wełnicki W.: *Mechanika ruchu okrętu*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1989.
- [10] Gapiński D.: Analiza układu optoelektronicznego zmodyfikowanego koordynatora celu, XIV Konf. Automatyzacji i Eksploatacji Systemów Sterowania i Łączności „ASMOR”. Jastrzębia Góra 2013, s. 79-87.
- [11] Gapiński D.: Wpływ zakłóceń pochodzących od startu pocisku raketowego na dokładność śledzenia celu powietrznego przez zaprojektowaną optoelektroniczną głowicę skanująco-śledzącą, *Obrona Przeciwpowietrzna Przegląd Osiągnięć*, Wydawnictwo Akademickie AMW, Gdynia 2017, s. 177-191.
- [12] Gapiński D.: Analysis of the impact of disruptions from the launch of missile on the stability of a scanning and tracking IR seeker operation, *Problemy Mechatroniki*, 8 (2017) 71-84.
- [13] Gapiński D.: Determination of dynamic reactions in the rotor bearings of a new design of a seeker head, *Problemy Mechatroniki*, 8 (2017) 73-86.
- [14] Gapiński D.: *Optyczny koordynator skanujący*, Patent PL 199721 B1.
- [15] Koruba Z.: *Dynamika i sterowanie giroskopem na pokładzie obiektu latającego*, Monografie, Studia, Rozprawy 25, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2001.
- [16] Koruba Z., Osiecki J.W.: *Budowa, dynamika i nawigacja pocisków raketowych bliskiego zasięgu*, cz. 1, skrypt nr 348 Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1999.
- [17] Koruba Z.: *Elementy teorii i zastosowań giroskopu sterowanego*, Monografie, Studia, Rozprawy M7, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2008.
- [18] Krzysztofik I., Osiecki J.W.: *Wykrywanie i śledzenie celów*, skrypt nr 430 Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2015.

- [19] Koruba Z., Krzysztofik I., Dziopa Z.: An analysis of the gyroscope dynamics of an anti-aircraft missile launched from a mobile platform, Bull. Polish Academy Sci. – Technical Sci., 58 (2010) 651-656.
- [20] Koskinen K.: Numerical simulation of ship motion due to waves and manoeuvring, Degree project in Naval Architecture second cycle, KTH Engineering Sciences, Stockholm, Sweden 2012.
- [21] Gapiński D., Krzysztofik I., Koruba Z.: Stabilność zaprojektowanego koordynatora skanującego w przeciwnolotnym pocisku raketowym, Problemy Mechatroniki, 6 (2015) 56-70.
- [22] Milewski S., Kobierski J.W., Chmielewski M.: Treningi morskich zestawów raketowo-artyleryjskich, ZN Akademii Marynarki Wojennej, 53 (2012) 87-100.
- [23] Ibrahim R.A., Grace M.I.: Modeling of ship roll dynamics and its coupling with heave and pitch, Math. Problems Eng., vol. 2010, Article ID 934714, 32 pages.
- [24] Das S.N., Das S.K.: Determination of coupled sway, roll, and yaw motions of a floating body in regular waves, Int. J. Math. Math. Sci., 41 (2004) 2181-2197.
- [25] Kornev N.: Ship Dynamics in Waves, Universität Rostock, Rostock 2011.
- [26] Spyrou K.J.: The nonlinear dynamics of ships in broaching, Marie Curie Fellowships Annals, 1 (2000) 1-7.

CONTROL OF A SELF-GUIDED SCANNING AND TRACKING IR SEEKER MOUNTED ON A MOBILE ARTILLERY-ROCKET SET

Summary

On the modern battlefield, there is a need to continually increase combat capabilities, including speed, target detection, target identification and fire-fighting performance of short-range artillery-rocket sets. A big challenge is the ability to effectively fire through such sets of conditions of interference, not only from the direction of targeted air strike, but also from the moving platform on which the artillery-rocket set with self-guided rocket missiles is located. The paper presents the analysis of the possibilities of controlling an innovative scanning and tracking IR seeker that is a part of missile launchers and is designed to detect and track the above-mentioned objects. Some results of numerical simulation tests are presented in a graphical form.

Keywords: IR seeker, control, detection and tracking of air targets, gyro system, homing

DOI: 10.7862/rm.2018.27

Otrzymano/received: 21.04.2018

Zaakceptowano/accepted: 12.07.2018