



## Stabilność zaprojektowanego koordynatora skanującego w przeciwlotniczym pocisku raketowym

Daniel GAPIŃSKI, Izabela KRZYSZTOFIK\*, Zbigniew KORUBA

*Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska,  
Al. 1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce*

*\* autor korespondencyjny, e-mail: pssik@tu.kielce.pl*

*Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 12.04.2015*

DOI: 10.5604/20815891.1149756

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono analizę stabilności zaprojektowanego koordynatora skanującego stosowanego w przeciwlotniczych pociskach raketowych samonaprowadzających się na promieniowanie podczerwone emitowane przez cel. Zadaniem koordynatora jest wykrycie, a następnie precyzyjne śledzenie celu powietrznego. Ważne jest zatem poznanie obszarów stabilnej jego pracy. Rozważano nieliniowy model dynamiki koordynatora. Analizę stabilności przeprowadzono metodą bezpośrednią Lapunowa. Wyniki badań przedstawiono w graficznej postaci.

**Słowa kluczowe:** mechatronika, koordynator celu, stabilność, pocisk przeciwlotniczy

### 1. WSTĘP

Układem napędowym zaprojektowanego koordynatora skanująco-śledzącego jest giroskop (wirnik) zawieszony w dwóch obrotowych czaszach tworzących tzw. przegub Cardana (rys. 1). Podstawowym jego zadaniem jest wyznaczenie na bieżąco położenia tzw. linii obserwacji celu. Oś wirnika jest osią optyczną układu poszukiwania i śledzenia wykrytego celu.

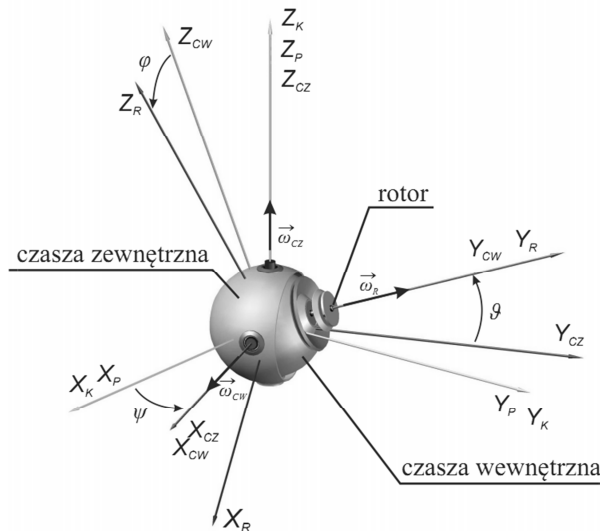
Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas X Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Ryn, 15-18 września 2014 r.

Za pomocą zamontowanych w poszczególnych czaszach silników elektrycznych przykładane są momenty sterujące do wirującego wirnika, dzięki czemu można zmieniać położenie jego osi w przestrzeni i tym samym realizować zadane ruchy programowe [1]. Określenie dopuszczalnych obszarów wartości zmiennych stanu koordynatora pozwala na prawidłową realizację sterowania jego osią.

W układach nieautonomicznych, do jakich należy koordynator skanujący, możemy mieć do czynienia z zaburzeniami jednoznacznie określonymi (np. tarcie w łożyskach poszczególnych czasz), zaburzeniami losowymi o znanych charakterystykach (wymuszenia pochodzące od wyrzutni lub pocisku raketowego) albo też z zaburzeniami przynależnymi do pewnej klasy funkcji czasu (np. zadane w procesie sterowania koordynatorem przemieszczenia kątowe jego osi). W niniejszej pracy przedstawiony jest przypadek zaburzeń całkowicie zdeterminowanych albo przynależnych do pewnej funkcji czasu.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY KOORDYNATORA

Na rysunku 1 pokazano schemat koordynatora wraz z przyjętymi układami współrzędnych oraz oznaczeniami poszczególnych kątów obrotu odpowiednich układów względem siebie.



Rys. 1. Schemat koordynatora wraz z przyjętymi układami współrzędnych

Fig. 1. The diagram of the seeker, including the adopted systems of coordinates

Wykorzystując równania Lagrange'a II rodzaju, wyprowadzono następujące równania ruchu koordynatora (giroskopu):

$$(J_{x_{CW}} + J_{x_R})\ddot{\vartheta} + (J_{x_{CW}} + J_{x_R})\dot{\omega}_{x_{CZ}} - (J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R})\omega_{y_{CW}}\omega_{z_{CW}} + J_{y_R}n\omega_{z_{CW}} = M_W - M_{TW} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & [J_{z_{CZ}} + J_{z_{CW}} + J_{z_R} + (J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R})\sin^2\vartheta]\dot{\omega}_{z_{CZ}} + \\ & + \frac{1}{2}(J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R})\sin 2\vartheta(\omega_{z_{CZ}}\dot{\vartheta} + \dot{\omega}_{y_{CZ}}) + \\ & - [J_{z_{CW}} + J_{z_R} + (J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R})\sin^2\vartheta]\omega_{y_{CZ}}\dot{\vartheta} - \\ & + (J_{z_{CW}} + J_{z_R})\omega_{z_{CW}}\omega_{x_{CW}}\sin\vartheta + J_{y_{CW}}\omega_{y_{CW}}\omega_{x_{CW}}\cos\vartheta + \\ & + J_{y_R}n\omega_{x_{CW}}\cos\vartheta - (J_{x_{CZ}} - J_{y_{CZ}})\omega_{x_{CZ}}\omega_{y_{CZ}} + \\ & - (J_{x_{CW}} + J_{x_R})\omega_{x_{CW}}\omega_{y_{CZ}} = M_Z - M_{TZ} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

- składowe prędkości kątowej czaszy zewnętrznej:
 
$$\begin{aligned} \omega_{x_{CZ}} &= \omega_{x_P}\cos\psi + \omega_{y_P}\sin\psi \\ \omega_{y_{CZ}} &= -\omega_{x_P}\sin\psi + \omega_{y_P}\cos\psi \\ \omega_{z_{CZ}} &= \dot{\psi} + \omega_{z_P} \end{aligned}$$
  - składowe prędkości kątowej czaszy wewnętrznej:
 
$$\begin{aligned} \omega_{x_{CW}} &= \omega_{x_{CZ}} + \dot{\vartheta} \\ \omega_{y_{CW}} &= \omega_{y_{CZ}}\cos\vartheta + \omega_{z_{CZ}}\sin\vartheta \\ \omega_{z_{CW}} &= -\omega_{y_{CZ}}\sin\vartheta + \omega_{z_{CZ}}\cos\vartheta \end{aligned}$$
  - składowe prędkości kątowej pocisku:  $\omega_{x_P}, \omega_{y_P}, \omega_{z_P}$
  - momenty bezwładności kompletnej czaszy zewnętrznej:  $J_{x_{CZ}}, J_{y_{CZ}}, J_{z_{CZ}}$
  - momenty bezwładności kompletnej czaszy wewnętrznej:  $J_{x_{CW}}, J_{y_{CW}}, J_{z_{CW}}$
  - momenty bezwładności wirnika:  $J_{x_R}, J_{y_R}, J_{z_R}$
  - moment sił oddziaływania pocisku na czaszę zewnętrzną:  $\vec{M}_Z$
  - moment sił oddziaływania czaszy zewnętrznej na wewnętrzną:  $\vec{M}_W$
  - momenty sił tarcia w łożyskach odpowiednio czaszy wewnętrznej i zewnętrznej:  $\vec{M}_{TW}, \vec{M}_{TZ}$ , przy czym  $\vec{M}_{TW} = c_w\dot{\vartheta}$ ,  $\vec{M}_{TZ} = c_z\dot{\psi}$
- gdzie:
- $c_w$  – współczynnik tarcia w łożysku czaszy wewnętrznej,
  - $c_z$  – współczynnik tarcia w łożysku czaszy zewnętrznej.

Zakładamy, że kinematyczne oddziaływanie podstawy jest znikome, czyli prędkości kątowe pocisku  $\omega_{x_p}, \omega_{y_p}, \omega_{z_p}$  są równe zero. Otrzymamy następujący układ równań ruchu koordynatora:

$$\begin{aligned} & (J_{x_{CW}} + J_{x_R}) \ddot{\vartheta} - \frac{1}{2} (J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R}) \dot{\psi}^2 \sin 2\vartheta - J_{y_R} n \dot{\psi} \cos \vartheta + \\ & + c_w \dot{\vartheta} = M_W \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & [J_{z_{CZ}} + J_{z_{CW}} + J_{z_R} + (J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R}) \sin^2 \vartheta] \ddot{\psi} + \\ & + (J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R}) \dot{\psi} \dot{\vartheta} \sin 2\vartheta + J_{y_R} n \dot{\vartheta} \cos \vartheta + c_z \dot{\psi} = M_Z \end{aligned} \quad (4)$$

## 2.1. Parametry koordynatora

Momenty bezwładności wirnika [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]:

$$J_{x_R} = 0.00157911, \quad J_{y_R} = 0.00114143, \quad J_{z_R} = 0.00158234$$

Momenty bezwładności kompletnej czaszy wewnętrznej [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]:

$$J_{x_{CW}} = 0.0011666, \quad J_{y_{CW}} = 0.0016663, \quad J_{z_{CW}} = 0.0011463$$

Momenty bezwładności kompletnej czaszy zewnętrznej [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]:

$$J_{x_{CZ}} = 0.0002213, \quad J_{y_{CZ}} = 0.0003383, \quad J_{z_{CZ}} = 0.0002583$$

Prędkość obrotowa wirnika:

$$n = 10000 \text{ [obr/min]}$$

Współczynniki tarcia w łożysku czaszy wewnętrznej i zewnętrznej:

$$c_w = 0.05 \text{ [N} \cdot \text{m} \cdot \text{s]}, \quad c_z = 0.05 \text{ [N} \cdot \text{m} \cdot \text{s]}$$

Maksymalny moment obrotowy silników sterujących:

$$M_{\max} = 0.8 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

Parametry regulatora zostały dobrane wg prac [2, 3] i przyjmowały następujące wartości:

$$k_W = 100, \quad k_Z = 1/2 \cdot \sqrt{2 + 4 \cdot k_W}, \quad h_Z = \sqrt{2 + 4 \cdot k_W}$$

## 3. STABILNOŚĆ KOORDYNATORA STEROWANEGO

Stabilność pracy koordynatora sterowanego zbadano metodą bezpośrednią Lapunowa [4-8]. Momenty sterujące  $M_W, M_Z$  przyłożone odpowiednio do czaszy wewnętrznej i zewnętrznej przyjmujemy w postaci:

$$M_W = -k_w \vartheta + k_z \psi - h_z \dot{\vartheta} \quad (5)$$

$$M_Z = -k_z \vartheta - k_w \psi - h_z \dot{\psi} \quad (6)$$

Po podstawieniu równań (5) i (6) do równań (3) i (4), otrzymujemy

$$\begin{aligned} (J_{x_{CW}} + J_{x_R}) \ddot{\vartheta} = & \frac{1}{2} (J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R}) \dot{\psi}^2 \sin 2\vartheta + J_{y_R} n \dot{\psi} \cos \vartheta - \\ & + c_w \dot{\vartheta} - k_w \vartheta + k_z \psi - h_z \dot{\vartheta} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} [J_{z_{CZ}} + J_{z_{CW}} + J_{z_R} + (J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R}) \sin^2 \vartheta] \ddot{\psi} = \\ = - (J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R}) \dot{\psi} \dot{\vartheta} \sin 2\vartheta + \\ - J_{y_R} n \dot{\vartheta} \cos \vartheta - c_z \dot{\psi} - k_z \vartheta - k_w \psi - h_z \dot{\psi} \end{aligned} \quad (8)$$

Wprowadzamy oznaczenia

$$J_{s1} = J_{x_{CW}} + J_{x_R}, \quad J_{s2} = J_{y_{CW}} - J_{z_{CW}} - J_{z_R}, \quad J_{s3} = J_{z_{CZ}} + J_{z_{CW}} + J_{z_R}$$

i zmienne stanu

$$x_1 = \vartheta, \quad x_2 = \dot{\vartheta}, \quad x_3 = \psi, \quad x_4 = \dot{\psi} \quad (9)$$

Otrzymujemy nieliniowy układ opisany równaniem

$$\dot{x} = f(x) \quad (10)$$

gdzie:

$$\dot{x} = [\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dot{x}_3 \quad \dot{x}_4]^T,$$

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{1}{2} \frac{J_{s2}}{J_{s1}} x_4^2 \sin 2x_1 + \frac{J_{y_R}}{J_{s1}} n x_4 \cos x_1 - \frac{c_w x_2}{J_{s1}} + \frac{M_W}{J_{s1}} \\ x_4 \\ - \frac{J_{s2} x_4 x_2 \sin 2x_1}{(J_{s3} + J_{s2} \sin^2 x_1)} - \frac{J_{y_R} n x_2 \cos x_1}{(J_{s3} + J_{s2} \sin^2 x_1)} - \frac{c_z x_4}{(J_{s3} + J_{s2} \sin^2 x_1)} + \frac{M_Z}{(J_{s3} + J_{s2} \sin^2 x_1)} \end{bmatrix}$$

Wyznaczamy funkcję Lapunowa w postaci [9, 10]:

$$V(x) = f^T(x) f(x) \quad (11)$$

Następnie wyznaczamy macierz  $\mathbf{F}$  z zależności:

$$\mathbf{F} = \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \quad (12)$$

gdzie macierz Jacobiego układu wynosi:

$$\mathbf{A} = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (13)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial f_1}{\partial x_2} = 1, \quad \frac{\partial f_1}{\partial x_3} = 0, \quad \frac{\partial f_1}{\partial x_4} = 0$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_1} = \frac{J_{s2}x_4^2 \cos 2x_1 - J_{yR}nx_4 \sin x_1 - k_w}{J_{s1}}, \quad \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = -\frac{c_w + h_z}{J_{s1}}, \quad \frac{\partial f_2}{\partial x_3} = \frac{k_z}{J_{s1}},$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_4} = \frac{J_{s2}x_4 \sin 2x_1 + J_{yR}n \cos x_1}{J_{s1}}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial f_3}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial f_3}{\partial x_3} = 0, \quad \frac{\partial f_3}{\partial x_4} = 1$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_4}{\partial x_1} &= \frac{-2J_{s2}x_2x_4 \cos 2x_1 + J_{yR}nx_2 \sin x_1 - k_z}{(J_{s3} + J_{s2} \sin^2 x_1)} + \\ &+ \frac{J_{s2}^2x_2x_4 2 \sin x_1 \cos x_1 \sin 2x_1 + J_{s2}J_{yR}nx_2 \cos^2 x_1 2 \sin x_1}{(J_{s3} + J_{s2} \sin^2 x_1)^2} + \\ &+ \frac{c_{zx}x_4J_{s2} 2 \sin x_1 \cos x_1 + (h_zx_4k_zx_1k_wx_3)J_{s2} 2 \sin x_1 \cos x_1}{(J_{s3} + J_{s2} \sin^2 x_1)^2} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial x_2} = \frac{-J_{s2}x_4 \sin 2x_1 - J_{yR}n \cos x_1}{(J_{s3} + J_{s2} \sin^2 x_1)}$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial x_3} = -\frac{k_w}{(J_{s3} + J_{s2} \sin^2 x_1)}$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial x_4} = \frac{-J_{s2}x_2 \sin 2x_1 - c_z - h_z}{(J_{s3} + J_{s2} \sin^2 x_1)}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{bmatrix}$$

W przypadku gdy momenty sterujące osiągną wartość maksymalną  $M_{\max}$  [1], do obliczania poszczególnych macierzy Jacobiego układu traktowane są one jako stałe. Pochodna funkcji Lapunowa [9, 10] wynosi:

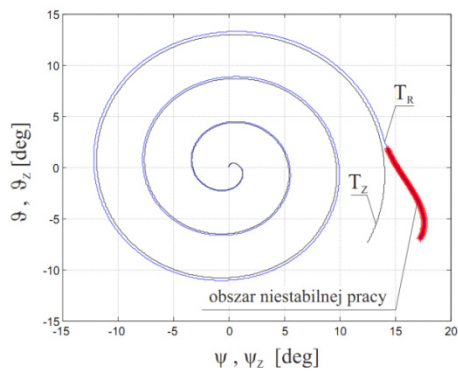
$$\dot{V}(x) = f^T \mathbf{F} f \quad (14)$$

Układ jest stabilny, jeśli pochodna funkcji Lapunowa jest ujemnie określona.

#### 4. WYNIKI BADAŃ

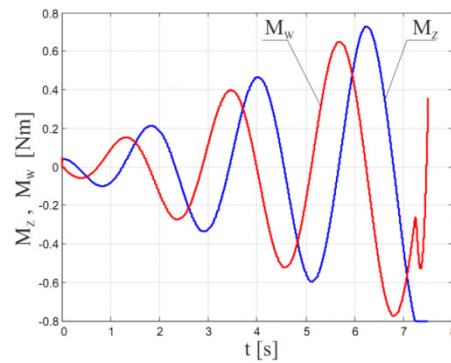
Poniżej pokazano przykłady obszarów stabilnej i niestabilnej pracy koordynatora dla różnych parametrów.

##### 4.1. Sprawdzenie stabilności koordynatora dla maksymalnej prędkości kątowej czaszy wewnętrznej w ruchu programowym jego osi po rozwijającej się spirali



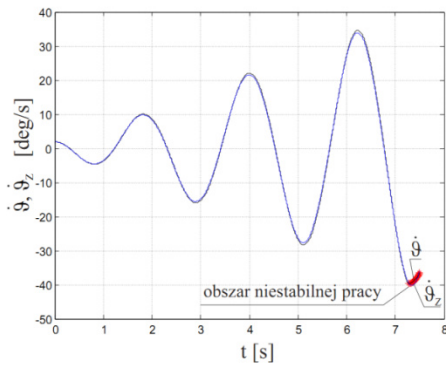
Rys. 2. Efekt niestabilnej pracy koordynatora

Fig. 2. The effect of unstable operation of the scanning seeker



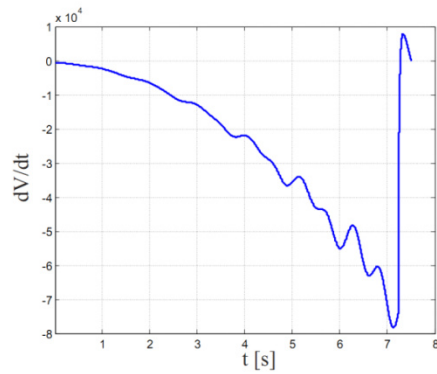
Rys. 3. Momenty sterujące czaszami zewnętrzną i wewnętrzną

Fig. 3. Control moments of the outer and inner housing



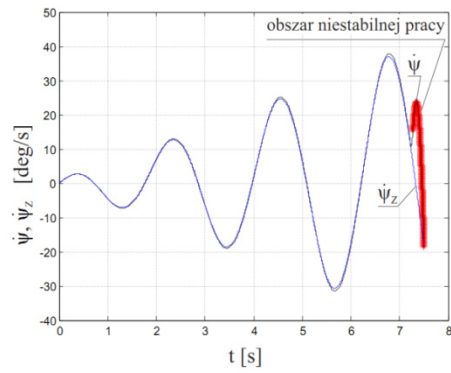
Rys. 4. Zadana  $\dot{\vartheta}_z$  i realizowana  $\dot{\vartheta}$  prędkości kątowej czaszy wewnętrznej

Fig. 4. Desired  $\dot{\vartheta}_z$  and actual  $\dot{\vartheta}$  angular velocity of inner housing



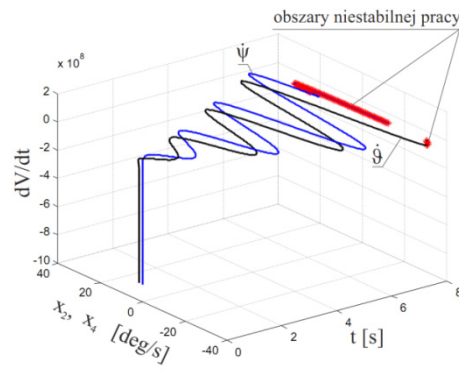
Rys. 6. Pochodna funkcji Lapunowa

Fig. 6. Derivative of the Lyapunov function



Rys. 5. Zadana  $\dot{\psi}_z$  i realizowana  $\dot{\psi}$  prędkości kątowej czaszy zewnętrznej

Fig. 5. Desired  $\dot{\psi}_z$  and actual  $\dot{\psi}$  angular velocity of outer housing

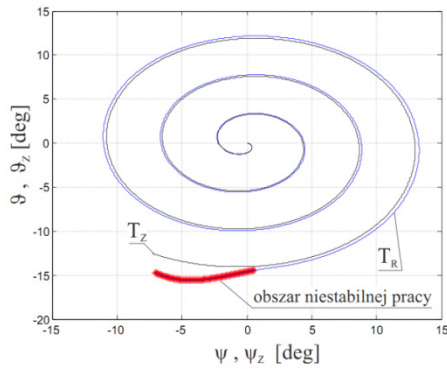


Rys. 7. Obszary stabilności pracy głowicy

Fig. 7. Seeker stability areas

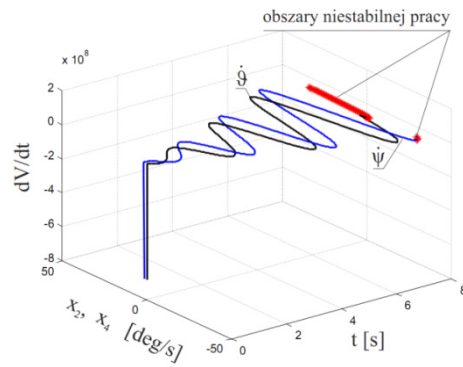


### 4.2. Sprawdzenie stabilności koordynatora dla maksymalnej prędkości kątowej czaszy zewnętrznej w ruchu programowym jego osi po rozwijającej się spirali



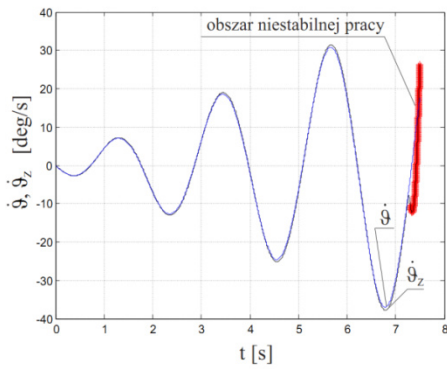
Rys. 8. Efekt niestabilnej pracy koordynatora

Fig. 8. The effect of unstable operation of the scanning seeker



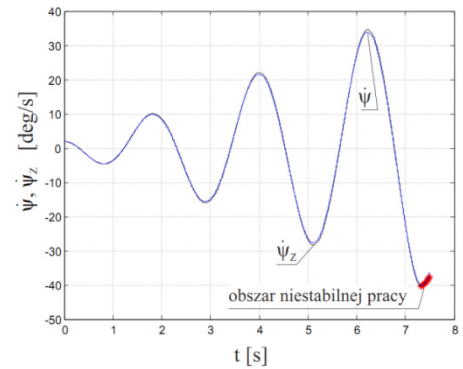
Rys. 9. Obszary stabilności pracy głowicy

Fig. 9. Seeker stability areas



Rys. 10. Zadana  $\dot{\psi}_z$  i realizowana  $\dot{\psi}$  prędkości kątowej czaszy wewnętrznej

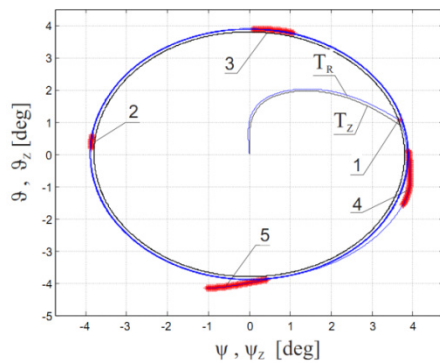
Fig. 10. Desired  $\dot{\psi}_z$  and actual  $\dot{\psi}$  angular velocity of inner housing



Rys. 11. Zadana  $\dot{\psi}_z$  i realizowana  $\dot{\psi}$  prędkości kątowej czaszy zewnętrznej

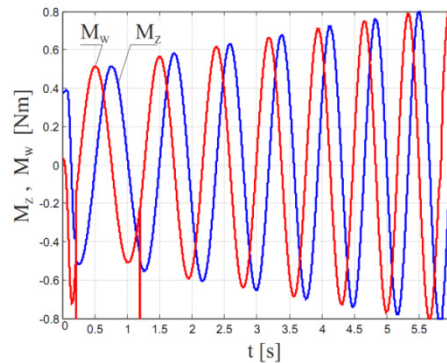
Fig. 11. Desired  $\dot{\psi}_z$  and actual  $\dot{\psi}$  angular velocity of outer housing

### 4.3. Sprawdzenie stabilności koordynatora dla maksymalnych prędkości kątowych czasz zewnętrznej i wewnętrznej w ruchu programowym osi urządzenia po powierzchni stożka kołowego



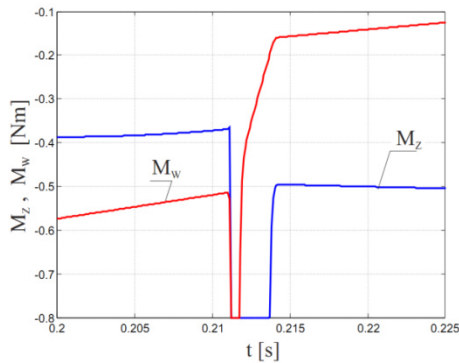
Rys. 12. Efekt niestabilnej pracy koordynatora

Fig. 12. The effect of unstable operation of the scanning seeker



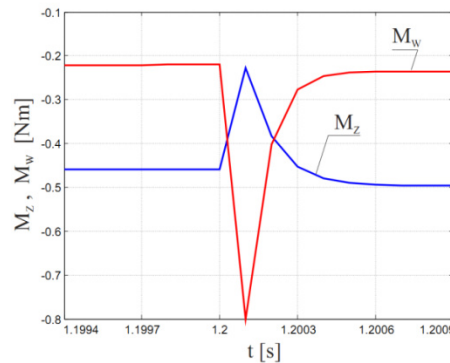
Rys. 13. Momenty sterujące czaszami zewnętrzną i wewnętrzną

Fig. 13. Control moments of the outer and inner housing



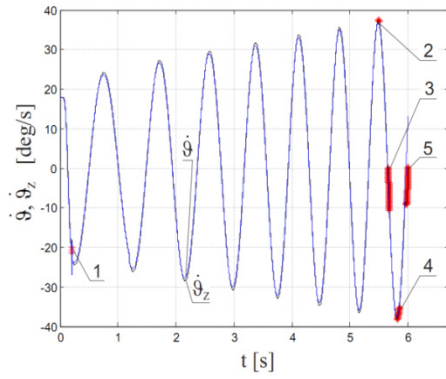
Rys. 14. Momenty sterujące w okresach przejściowych

Fig. 14. Control moments in transitional periods

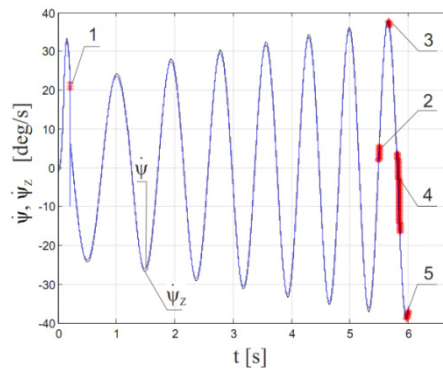


Rys. 15. Momenty sterujące w okresach przejściowych

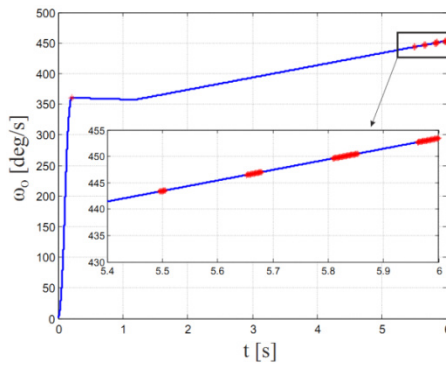
Fig. 15. Control moments in transitional periods



Rys. 16. Prędkości kątowe czaszy wewnętrznej: zadana  $\dot{\vartheta}_z$  i realizowana  $\dot{\vartheta}$   
 Fig. 16. Desired  $\dot{\vartheta}_z$  and actual  $\dot{\vartheta}$  angular velocity of inner housing

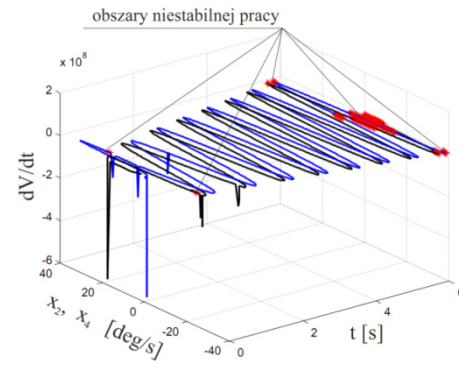


Rys. 17. Prędkości kątowe czaszy zewnętrznej: zadana  $\dot{\psi}_z$  i realizowana  $\dot{\psi}$   
 Fig. 17. Desired  $\dot{\psi}_z$  and actual  $\dot{\psi}$  angular velocity of outer housing



Rys. 18. Zadana prędkość kątowa zataczania stożka kołowego przez oś koordynatora

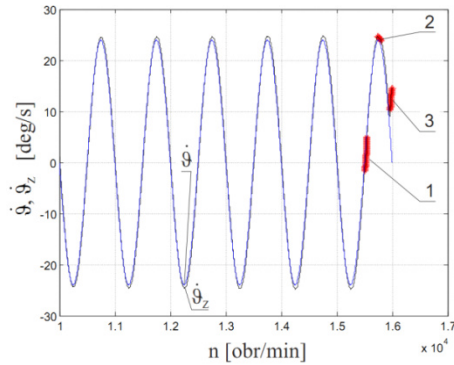
Fig. 18. The set angular velocity of circling around a circular cone by the seeker axis



Rys. 19. Obszary stabilności pracy głowicy

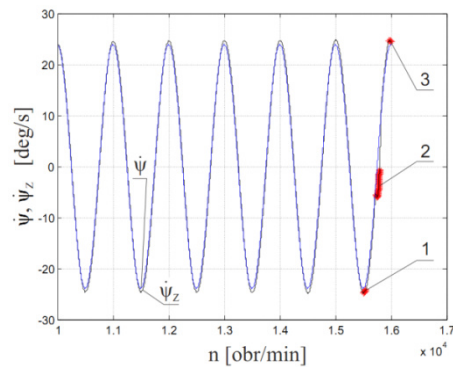
Fig. 19. Seeker stability areas

#### 4.4. Sprawdzenie stabilności koordynatora dla maksymalnych prędkości obrotowych wirnika



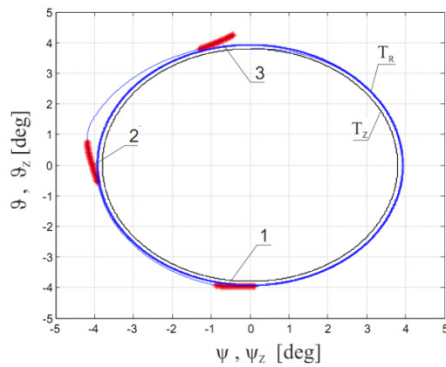
Rys. 20. Wpływ prędkości obrotowej wirnika na stabilność koordynatora

Fig. 20. The impact of rotor velocity on the seeker stability



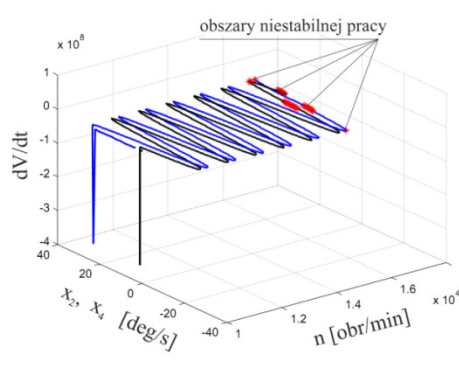
Rys. 21. Wpływ prędkości obrotowej wirnika na stabilność koordynatora

Fig. 21. The impact of rotor velocity on the seeker stability



Rys. 22. Efekt niestabilnej pracy koordynatora

Fig. 22. The effect of unstable operation of the scanning seeker



Rys. 23. Obszary stabilności pracy głowicy

Fig. 23. Seeker stability areas

## 5. WNIOSKI

Otrzymane wyniki badań symulacyjnych pokazują, że przy niewłaściwie dobranych parametrach ruchu programowego (zadanego) dla sterowania osią koordynatora, można przy różnych zakresach wychyleń i prędkości kątowych poszczególnych czasz wejść w obszar niestabilnej jego pracy, co przedstawiono na rysunkach 7, 9 i 19.

Bezpośrednim efektem wystąpienia niestabilności podczas pracy urządzenia będzie wytrącenie jego osi z prawidłowego ruchu nadążnego za trajektorią zadaną  $T_z$ , co przedstawiają wykresy na rysunkach 2, 8 i 12. Z przeprowadzonej analizy wynika również, że dla podanych w pkt. 2.1 parametrów koordynatora można sterować wychyleniami poszczególnych jego czasz z maksymalną prędkością kątową nie przekraczającą 38 [deg/s], co zostało przedstawione na rysunkach 4, 5, 10, 11, 16 i 17. Aby nie przekroczyć maksymalnych prędkości wychyleń kątowych poszczególnych czasz w ruchu programowym po powierzchni stożka kołowego, należy tak dobrać prędkość zataczania  $\omega_o$ , aby nie przekraczała ona wartości odczytanej z rysunku 18, czyli około 440 [deg/s]. Wpływ na niestabilną pracę koordynatora mogą mieć również nieprawidłowo dobrane parametry przejścia zadanych trajektorii przemieszczania jego osi, co zostało przedstawione na rysunkach 12, 16 i 17 (punkty nr 1 na wykresach) i jest powodem skokowych zmian momentów sterujących przedstawionych na rysunkach 14 i 15. Ponumerowane na rysunku 12 obszary niestabilności odpowiadają tym samym obszarom na rysunkach 16 i 17.

W punkcie 4.4 dokonano analizy stabilności pracy koordynatora przy maksymalnych prędkościach obrotowych wirnika. Z rysunków 20 i 21 wynika, iż przy prędkościach kątowych poszczególnych czasz urządzenia wahających się w przedziałach od  $-24$  do  $+24$  [deg/s] powyżej prędkości obrotowej wirnika wynoszącej około 15 400 [obr/min] koordynator traci stabilność. Ponumerowane na rysunku 22 obszary niestabilności odpowiadają tym samym obszarom na rysunkach 20 i 21. Należy zatem, projektując układ sterowania koordynatorem, dobierać takie jego parametry i wprowadzać takie ograniczenia na zmienne stanu, aby uniknąć obszarów niestabilnej pracy. Wspomniane obszary wpływają bowiem bardzo niekorzystnie na dokładność naprowadzania pocisku raketowego na cel, a nawet na całkowite wyjście obrazu celu z pola widzenia układu optoelektronicznego głowicy.

## LITERATURA

- [1] Gapiński D., Koruba Z., Krzysztofik I., The model of dynamics and control of modified optical scanning seeker in anti-aircraft rocket missile, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 45, Issue 2, pp. 433-447, DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.11.016.
- [2] Awrejcewicz J., Koruba Z., *Classical mechanics. Applied mechanics and mechatronics*, vol. 30, Springer, New York, 2012.
- [3] Koruba Z., Elementy teorii i zastosowań giroskopu sterowanego, *Monografie, Studia, Rozprawy M 7*, Wydawnictwo PŚk, Kielce, 2008.
- [4] Datta B.N., *Numerical Methods for Linear Control Systems*, Elsevier, 2004.

- [5] Khalil H.K., *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [6] Machowski J., Białek J., Bumby J.R., *Power System Dynamics: Stability and Control*, 2nd Edition, Wiley, 2008.
- [7] Marquez H.J., *Nonlinear Control Systems: Analysis and Design*, Wiley, 2003.
- [8] Slotine J.J. E., Li W., *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, New Jersey, 1991.
- [9] Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R., *Podstawy teorii sterowania*, WNT, Warszawa, 2006.
- [10] Radziszewski B., *Elementy teorii stabilności*, Monografia nr 19, Wydawnictwo PŚk, Kielce, 1999.

## **Stability of the Designed Scanning Seeker in Anti-Aircraft Rocket Missile**

Daniel GAPIŃSKI, Izabela KRZYSZTOFIK, Zbigniew KORUBA

**Abstract.** The paper presents an analysis of the stability of the designed scanning seeker used in anti-aircraft homing missiles. The task of the seeker is to detect and to precisely track the air target. It is therefore important to know the stability areas. Nonlinear model of the seeker dynamics was considered. Stability analysis by Lyapunov method was conducted. The results of research were presented in graphical form.

**Keywords:** mechatronics, seeker, stability, anti-aircraft missile