

mgr inż. Marta Grzyb  
dr inż. Konrad Stefański  
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

## **NAPROWADZANIE BOMBY KIEROWANEJ Z WYKORZYSTANIEM SPECJALNEGO ALGORYTMU DLA IDENTYFIKACJI I ŚLEDZENIA CELU**

*W pracy zaprezentowano algorytm samonaprowadzania bomby kierowanej na cel ruchomy przy pomocy układu optycznego dla wykrywania i śledzenia celów ruchomych, emitujących promieniowanie w zakresie podczerwieni. Metoda sterowania polega na wykorzystaniu trajektorii fazowych uchybów sterowania. Wyniki badań symulacji komputerowej przedstawione są w postaci graficznej.*

### **GUIDING A SMART BOMB USING A SPECIAL ALGORITHM FOR TARGET IDENTIFICATION AND TRACKING**

*The paper discusses an algorithm the guidance of smart bombs used against mobile targets using the optical system for detect and track the mobile targets emitting infrared radiation. The described method involves phase trajectories of the system errors. The results of the computer simulation are presented in a graphical form.*

#### **1. WSTĘP**

Poszukiwanie celu w przestrzeni może odbywać się bezpośrednio przez pilota np. samolotu wykorzystującego krzyż celowniczy. W bardziej zaawansowanych urządzeniach proces poszukiwania celu może odbywać się automatycznie. Wówczas jest mowa o automatycznym przeszukiwaniu przestrzeni lub inaczej o skanowaniu przestrzeni. Przeszukiwanie może wtedy odbywać się metodą aktywną polegającą na ciągłym opromieniowaniu celu falami elektromagnetycznymi przez nadajnik znajdujący się w bombie i odbieraniu fal odbitych od celu przez układ odbiorczy umieszczony w bombie lub metodą pasywną polegającą na wychwytywaniu fal emitowanych przez sam cel. Przeszukiwanie można podzielić na dwie podstawowe grupy: przeszukiwanie dwuwymiarowe i przeszukiwanie przestrzenne. W pierwszym przypadku trzeba ograniczyć się jedynie do wyznaczenia dwóch współrzędnych celu, tj. do wyznaczenia dwóch kątów określających położenie linii obserwacji celu względem stanowiska obserwacyjnego (przeszukiwanie pasywne). W drugim przypadku, obok wymienionych kątów wyznacza się dodatkowo trzecią współrzędną położenia celu, a mianowicie jego aktualną odległość od bomby (przeszukiwanie aktywne).

Skanowaniem zazwyczaj nazywamy szeregowy (kolejny) sposób przeszukiwania, na ogół dużej przestrzeni, za pomocą chwilowych przechwytywań celu obiektywem o wąskim polu widzenia. Dzięki wąskokątnemu obiektywowi są one bardziej odporne na zakłócenia. Układy skanujące są najczęściej układami optyczno-mechanicznymi.

W pracy zaprezentowano naprowadzanie bomby kierowanej z wykorzystaniem specjalnego algorytmu dla identyfikacji i śledzenia celu ruchomego. W końcowej fazie ataku zachodzi samonaprowadzanie bomby na cel emitujący promieniowanie podczerwone (czołg lub wóz bojowy). Nowością jest tu zastosowanie opisanego poniżej algorytmu skanowania przestrzeni i śledzenia wykrytego celu do naprowadzania bomby kierowanej. Wcześniej algorytm ten wykorzystany został do naprowadzania rakiet przeciwlotniczych bliskiego zasięgu.

## 2. OPIS PROCESU NAPROWADZANIA BOMBY

Równania ruchu bomby kierowanej w ogólnej postaci wyglądają następująco [1]:

$$\begin{aligned}\frac{d\Pi_b}{dt} &= F_z + Q_s \\ \frac{dK_b}{dt} &= M_z + M_s\end{aligned}\quad (1)$$

gdzie:  $\Pi_b$  - wektor pędu bomby;

$K_b$  - wektor krętu bomby;

$F_z$  - wypadkowy wektor sił zewnętrznych działających na bombę;

$M_z$  - wypadkowy wektor momentu sił zewnętrznych działających na bombę;

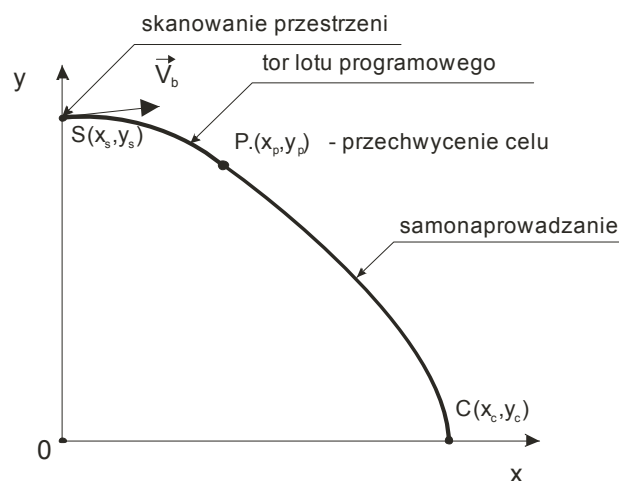
$Q_s$  - wektor sił sterujących bombą;

$M_s$  - wektor momentu sił sterujących bombą.

Siły sterujące  $Q_s$  i momenty sterujące  $M_s$  wyznaczamy na podstawie algorytmu według zadanego toru lotu opisanego poniżej.

Proponowany algorytm sterowania, podobnie jak w pracy [3], składa się z dwóch odcinków:

- odcinek I – zbliża bombę do punktu rozpoczęcia „ataku”,
- odcinek II – „krzywa ataku”, której celem jest samonaprowadzanie bomby według określonego algorytmu na cel emitujący promieniowanie podczerwone. Przykładowy tor pokazany został na rys. 1.



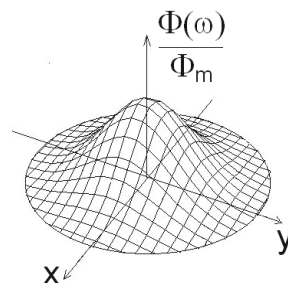
Rys. 1. Proponowany tor lotu bomby

Pierwszą część toru przyjmujemy w uproszczonej postaci, jako krzywa łączącą punkt uruchomienia sterowania  $S = (x_s, y_s)$  z punktem  $P = (x_p, y_p)$ . W punkcie  $S = (x_s, y_s)$  następuje uruchomienie sterowania, a sygnały sterujące (pożądane) powodują, że oś giroskopu zatacza w przestrzeni powierzchnię stożkową o zmiennym kącie wierzchołkowym, tak, aby „rysowała” ona na powierzchni sferycznej spiralę Archimedesesa lub aby zataczała powierzchnię o przekroju „rozety”. Wartości momentów bezwładności giroskopu zostały tak dobrane, aby czas skanowania przestrzeni był wystarczająco krótki ( $<1s$ ). Do momentu osiągnięcia punktu  $P = (x_p, y_p)$  bomba porusza się po torze lotu programowego. Z chwilą przechwycenia celu i dokonania jego namiaru, układ przechodzi w stan śledzenia i realizowany jest algorytm samonaprowadzania według proporcjonalnej nawigacji (druga część toru).

## 2.1 Opis skanowania przestrzeni i śledzenia celu

Obraz przejmowany przez układ skanujący jest „plamką” o niejednorodnym rozkładzie natężenia promieniowania. Przyjęto, że rozkład ten jest osiowo symetryczny, a jego osiowy przekrój ma kształt krzywej Gaussa (rys. 2). Układ optyczny przechwytuje cel, gdy natężenie promieniowania przekroczy wartość progową. Ma to miejsce w punkcie  $P = (x_p, y_p)$ .

W proponowanym układzie zespół optyczny umocowany jest w osi giroskopu zawieszonoego na przegubie Cardana i drogą sterowania ruchem tej osi dokonywane jest skanowanie przestrzeni.

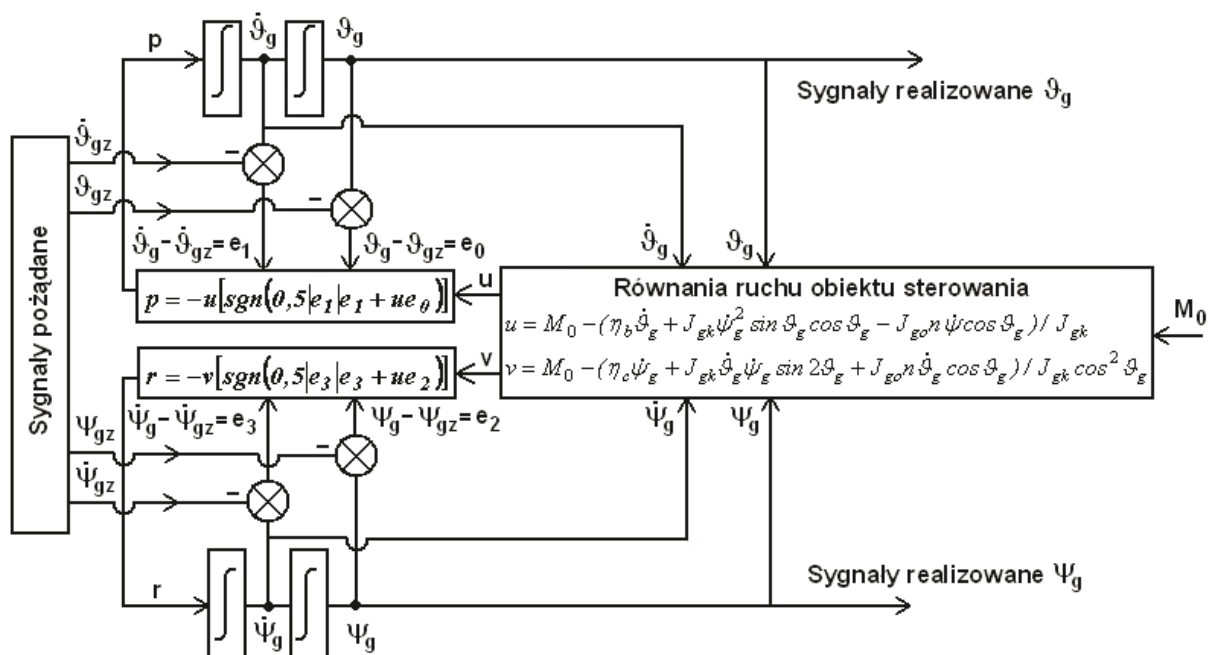


Rys. 2. Rozkład energii promieniowania emitowanego przez cel

W omawianym przypadku automatyka pracy urządzenia jest podzielona na dwa zakresy:

1) skanowanie przestrzeni jako operacja wstępna i 2) wyznaczenie środka palmy podczerwieni emitowanej przez cel. Promieniujący cel jest „widziany” przez układ optyczny w postaci „plamki”, której kształt przyjmuje się w postaci koła o danym promieniu  $R$ , zależnym w przybliżeniu od odległości  $r$  celu od układu optycznego.

Sterowanie ruchem osi giroskopu zostało zrealizowane za pomocą trajektorii uchybów sterowania zmierzających do zera. Schemat tego sterowania pokazano na rys. 3. Równania ruchu osi giroskopu przyjęto w zakresie nieliniowym, dla dowolnie dużych kątów odchylenia, przy liniowych charakterystykach sił oporu (wiskotycznych) w łożyskach przegubu Cardana.



Rys. 3. Schemat blokowy skanowania i śledzenia celu

Algorytm skanowania przestrzeni i następnie śledzenia wykrytego celu został wyznaczony w oparciu o [4] [5] i przedstawia się następująco:

$$p = -u \operatorname{sgn}\left(0.5 \left| \frac{de_1}{dt} \right| \frac{de_1}{dt} + u e_0 \right) \quad (2a)$$

$$r = -v \operatorname{sgn}\left(0.5 \left| \frac{de_3}{dt} \right| \frac{de_3}{dt} + v e_2 \right) \quad (2b)$$

Sygnaly sterujace  $u$  i  $v$  wyznaczone zostaly jako rownania ruchu obiektu sterowania (giroskopu) i przedstawione sa w schemacie na rys.3. Uchyby mierzone w czasie skanowania przedstawiaja sie tak:

$$e_0 = \mathcal{G}_g - \mathcal{G}_{gz} \quad (3a)$$

$$e_1 = \dot{\mathcal{G}}_g - \dot{\mathcal{G}}_{gz} \quad (3b)$$

$$e_2 = \psi_g - \psi_{gz} \quad (3c)$$

$$e_3 = \dot{\psi}_g - \dot{\psi}_{gz} \quad (3d)$$

gdzie:  $\mathcal{G}_g, \mathcal{G}_{gz}$  - kat pochylenia osi giroskopu realizowany i zadany;

$\psi_g, \psi_{gz}$  - kat odchylenia osi giroskopu realizowany i zadany.

W chwili namierzenia celu, aby mozliwe bylo jego sledzenie i przez to naprowadzanie na niego bomby, nalezy dokonac przełaczenia w bloku wyznaczajacym sygnaly sterujace  $u$  i  $v$  wprowadzajac nowe uchyby:

- w miejsce  $e_0$  podstawiajac  $e_u = \mathcal{G}_g - \varepsilon$ ,
- w miejsce  $e_1$  podstawiajac  $e_{u1} = \dot{\mathcal{G}}_g - \dot{\varepsilon}$ ,
- w miejsce  $e_2$  podstawiajac  $e_v = \psi_g - \sigma$ ,
- w miejsce  $e_3$  podstawiajac  $e_{v1} = \dot{\psi}_g - \dot{\sigma}$ .

gdzie:  $\varepsilon, \sigma$  - katy pochylenia i odchylenia linii obserwacji celu.

## 2.2 Opis procesu samonaprowadzania bomby

Rownania kinematyczne ruchu wzajemnego bomby i ruchomego celu naziemnego, zwane takze rownaniami ruchu linii obserwacji celu (LOC), mozemy przedstawic za pomoca nastepujacych rownan:

$$\frac{dr}{dt} = V_c [\cos(\varepsilon - \gamma_c) \cos \sigma \cos \chi_c + \sin \sigma \sin \chi_c] + \quad (4)$$

$$- V_b [\cos(\varepsilon - \gamma_b) \cos \sigma \cos \chi_b + \sin \sigma \sin \chi_b]$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_b \cos \chi_b \sin(\varepsilon - \gamma_b) - V_c \cos \chi_c \sin(\varepsilon - \gamma_c)}{r \cos \sigma} \quad (5)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{V_b [\cos(\varepsilon - \gamma_b) \sin \sigma \cos \chi_b - \cos \sigma \sin \chi_b]}{r} + \quad (6)$$

$$- \frac{V_c [\cos(\varepsilon - \gamma_c) \sin \sigma \cos \chi_c - \cos \sigma \sin \chi_c]}{r}$$

gdzie:  $r$  - wzajemna odleglosc bomby i celu;

$V_b$  - prędkosć lotu bomby;

$V_c$  - prędkość lotu celu;

$\gamma_b, \chi_b$  - kąty lotu bomby;

$\gamma_c, \chi_c$  - kąty pochylenia i odchylenia wektora prędkości celu.

Algorytm samonaprowadzania bomby przyjmujemy według proporcjonalnej nawigacji:

$$\frac{d\chi_b}{dt} = a_\sigma \frac{d\sigma}{dt} \quad (7a)$$

$$\frac{d\gamma_b}{dt} = a_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (7b)$$

gdzie:  $a_\sigma, a_\varepsilon$  - stałe współczynniki proporcjonalnej nawigacji.

Do realizacji algorytmu samonaprowadzania muszą być znane wartości początkowe:

$$r_o = \sqrt{(x_{bo} - x_{co})^2 + (y_{bo} - y_{co})^2 + (z_{bo} - z_{co})^2} \quad (8)$$

$$\sigma_o = \arcsin \frac{y_{co} - y_{bo}}{r_o} \quad (9)$$

$$\varepsilon_o = \arctg \frac{z_{bo} - z_{co}}{x_c - x_b} \quad (10)$$

Sterowanie lotem bomby kierowanej odbywa się za pomocą wychylenia powierzchni sterowych lotek, steru kierunku i steru wysokości odpowiednio o kąty:  $\delta_l, \delta_m$  i  $\delta_n$ .

Realizacji żądanego toru lotu bomby kierowanej dokonuje pilot automatyczny (AP), który wypracowuje sygnały sterujące dla układu wykonawczego sterowania na podstawie następujących uchybów kątowych:

$$e_y = \gamma_{br} - \gamma_b \quad (11)$$

$$e_z = \gamma_{bz} - \gamma_b \quad (12)$$

gdzie:  $\gamma_{br}, \chi_{br}$  - realizowane kąty lotu bomby;  $\gamma_b, \chi_b$  - zadane kąty lotu bomby.

Przy założeniu, że regulator autopilota jest typu PID, siły sterujące dla kanału pochylenia i odchylenia bomby będą miały postać:

$$Q_{sy} = k_y e_y + i_y \int_0^{t_k} e_y dt + h_y \frac{de}{dt} \quad (13)$$

$$Q_{sz} = k_z e_z + i_z \int_0^{t_k} e_z dt + h_z \frac{de}{dt} \quad (14)$$

gdzie:  $k_y, k_z, i_y, i_z, h_y, h_z$  - współczynniki wzmożeń regulatora.

### 3. OTRZYMANE WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNEJ

Dla sprawdzenia poprawności działania układu, przeprowadzono symulację cyfrową w języku programowania MATLAB dla „hipotetycznej” bomby. Zaproponowany w tej pracy układ optyczny pozwala na śledzenie i przechwycenie naziemnego celu ruchomego przez bombę. Sterowanie ruchem osi giroskopu zostało zrealizowane za pomocą trajektorii uchybów sterowania zmierzających do zera.

Parametry regulatora autopilota zostały dobrane w sposób optymalny, ze względu na minimum uchybu między ruchem zadany a rzeczywistym bomby kierowanej [2], a ich wartości wynoszą odpowiednio:  $k_y = 250000$ ,  $i_y = 200000$ ,  $h_y = 20000$ ,  $k_z = 180000$ ,  $i_z = 150000$ ,  $h_z = 10000$ . Stałe współczynniki proporcjonalnej nawigacji wynosiły odpowiednio:  $a_\sigma = a_\varepsilon = 3,5$ .

W pracy rozważono dwa rodzaje skanowania przestrzeni, realizowane przez układ optyczny: skanowanie przestrzeni według spirali Archimedesesa oraz skanowanie przestrzeni o przekroju w kształcie „rozety”.

Przyjęto następujące dane giroskopu:  $J_{gk} = 0,0037 \text{ kgm}^2$ ,  $J_{go} = 0,0055 \text{ kgm}^2$ ,  $n = 600 \text{ rad/s}$  oraz jego wymiary: średnica krążka -  $d_k = 0,07 \text{ m}$ , masa -  $m_k = 0,75 \text{ kg}$ .

Dane przyjęte dla „hipotetycznej” bomby wynosiły:  $J_k = 18,75 \text{ kgm}^2$ ,  $J_{ok} = 0,78 \text{ kgm}^2$ ,  $l = 1,50 \text{ m}$ ,  $d = 0,25 \text{ m}$ ,  $e = 0,85 \text{ m}$ ,  $m = 100 \text{ kg}$ .

### 3.1 Przypadek 1

W tym przypadku oś giroskopu zatacza rozwijającą się powierzchnię stożkową o równaniach:

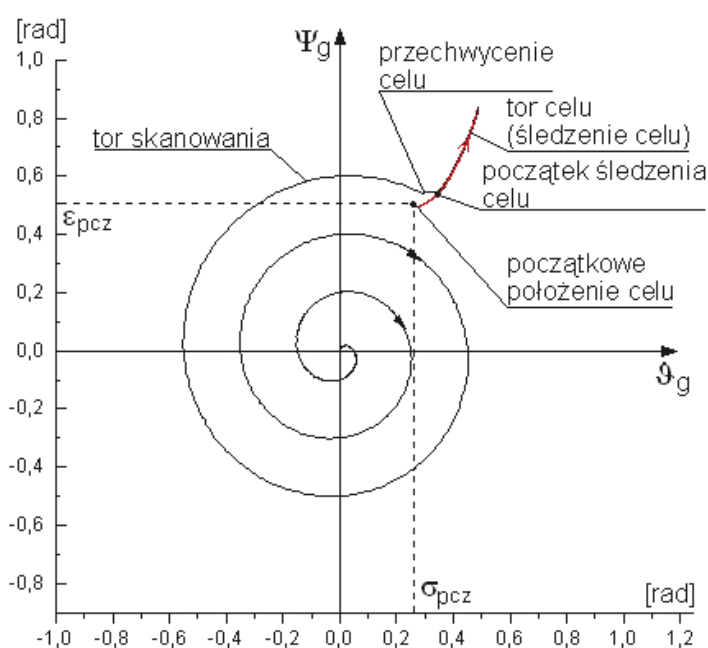
$$\vartheta_{gz} = at \sin \omega t, \quad \psi_{gz} = bt \cos \omega t \quad (15)$$

gdzie:  $a = b = 1,6 \text{ rad}$ ,  $\omega = 48,87 \text{ rad/s}$ .

Początkowe położenie celu wynosi:  $\varepsilon_{pcz} = 0,5 \text{ rad}$  i  $\sigma_{pcz} = 0,27 \text{ rad}$ ; początkowa odległość celu od układu optycznego  $r_0 = 4330 \text{ m}$ . Prędkość celu  $V_c = 20 \text{ m/s}$ . Inicjujący moment  $M_0 = 100 \text{ Nm}$ . Tor lotu celu określony jest równaniami:

$$\sigma = \sigma_{pcz} + \frac{V_c}{r_0} t, \quad \varepsilon = \varepsilon_{pcz} + \frac{V_c}{r_0} t^2 \quad (16)$$

Obliczenia przeprowadzono według schematu pokazanego na rys. 3. Wynik symulacji widoczny jest na rys. 4. Przechwycenie celu nastąpiło po czasie  $t_c = 0,439 \text{ s}$ .



Rys. 4. Wyniki symulacji numerycznej dla przypadku 1

Końcowy błąd śledzenia określony jest wzorem:

$$uch = \sqrt{(\vartheta_g - \sigma)^2 + (\psi_g - \varepsilon)^2} \quad (17)$$

W tym przypadku wyniósł on:  $uch = 2,17 \cdot 10^{-3}$  rad.

### 3.2 Przypadek 2

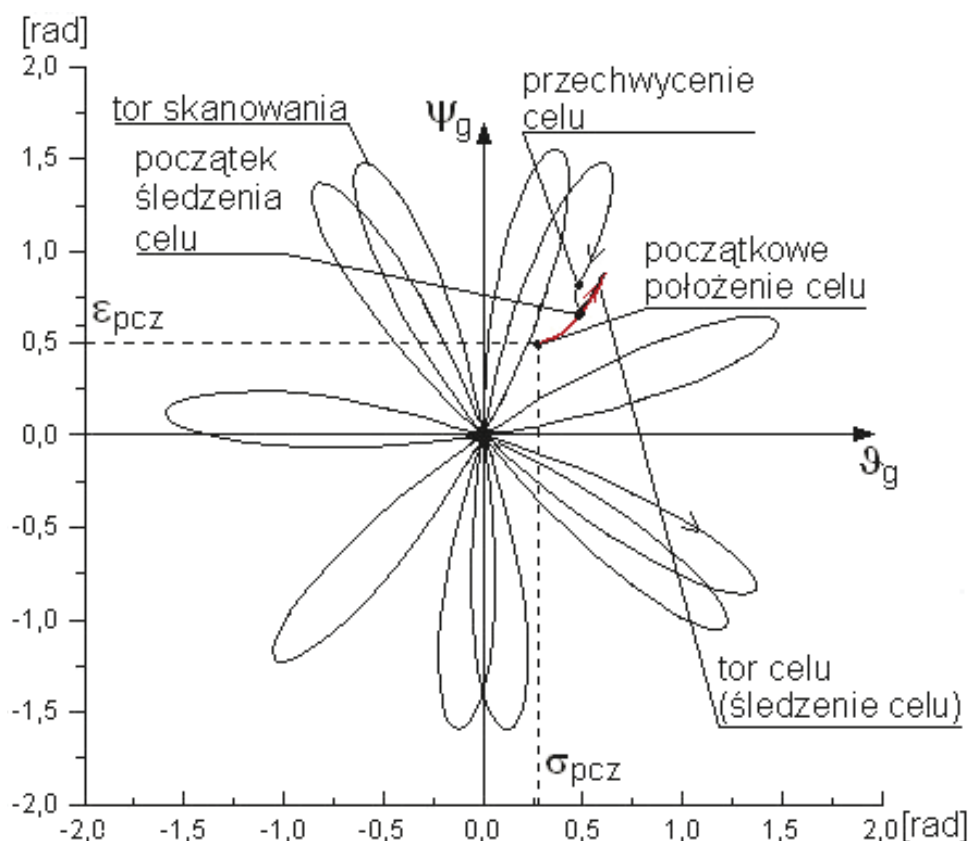
W tym przypadku oś giroskopu zatacza powierzchnię o przekroju w kształcie „rozety” opisanej równaniami:

$$\vartheta_{gz} = a \sin \omega_1 t \sin \omega t, \quad \psi_{gz} = a \sin \omega_1 t \cos \omega t \quad (18)$$

gdzie:  $a = 1,6$  rad,  $\omega = 48,87$  rad/s,  $\omega_1 = \frac{20}{3} \omega$  rad/s.

Początkowe położenie celu, początkowa odległość celu od układu optycznego i prędkość celu są identyczne jak w przypadku 1. Inicjujący moment wynosi również  $M_0 = 100$  Nm. Cel porusza się po torze określonym równaniami (16).

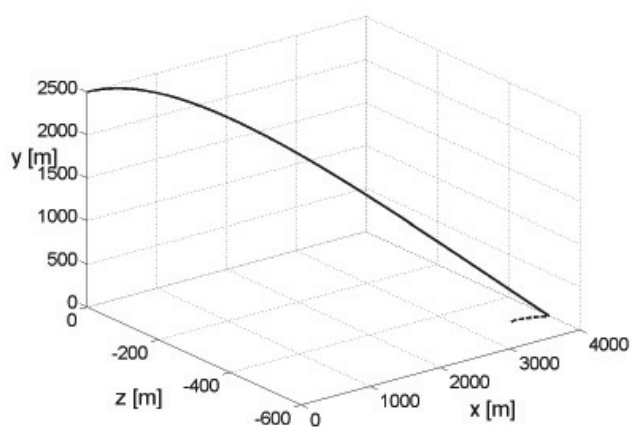
Obliczenia przeprowadzono według schematu pokazanego na rys. 3. Wynik symulacji widoczny jest na rys. 5. Przechwycenie celu nastąpiło po czasie  $t_c = 0,184$  s, a końcowy błąd śledzenia określony równaniem (17) wyniósł:  $uch = 4,07 \cdot 10^{-3}$  rad.



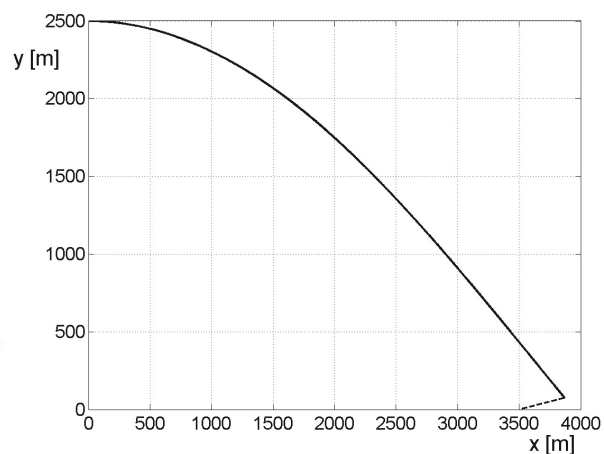
Rys. 5. Wyniki symulacji numerycznej dla przypadku 2

Dla przedstawionych powyżej dwóch przypadków skanowania przestrzeni otrzymano następujące wykresy dla bomby kierowanej w języku programowania MATLAB:

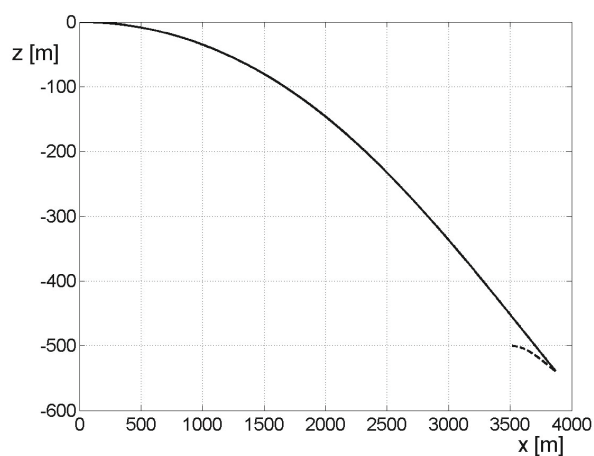




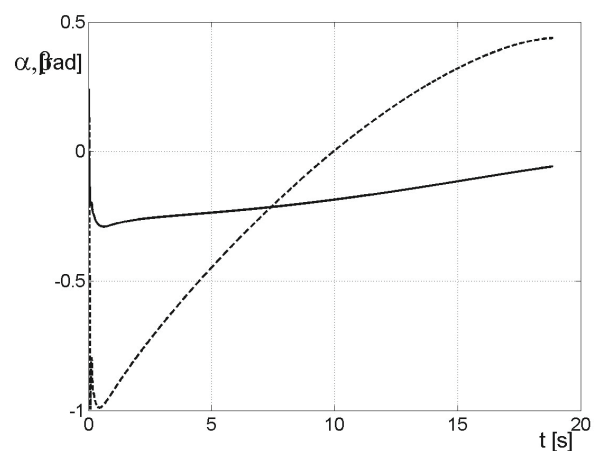
Rys. 6. Tory lotu bomby ( $V_{bo} = 250 \text{ m/s}$ ) do celu ruchomego ( $V_c = 20 \text{ m/s}$ ) dla różnych początkowych kątów lotu



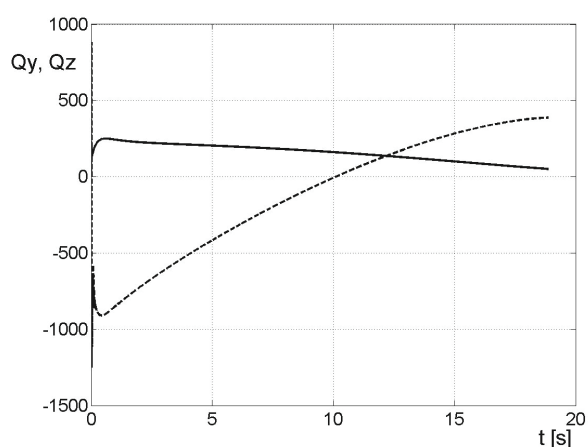
Rys. 7. Trajektoria ruchu bomby w płaszczyźnie pionowej dla:  $V_{bo} = 250 \text{ m/s}$  i  $V_c = 20 \text{ m/s}$



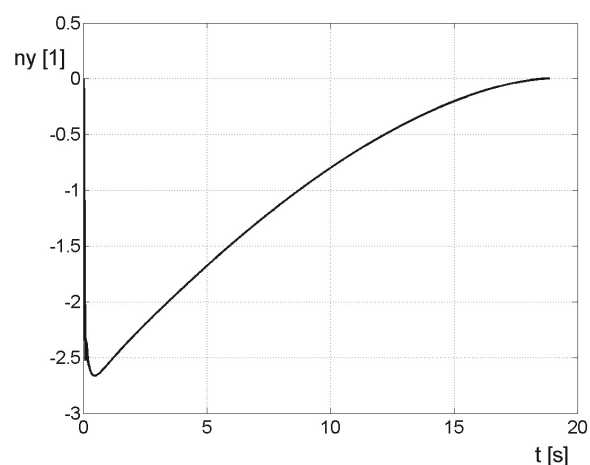
Rys. 8. Trajektoria ruchu bomby w płaszczyźnie poziomej dla:  $V_{bo} = 250 \text{ m/s}$  i  $V_c = 20 \text{ m/s}$



Rys. 9. Kąty natarcia (linia przerywana) i ślizgu (linia ciągła) dla:  $V_{bo} = 250 \text{ m/s}$  i  $V_c = 20 \text{ m/s}$



Rys. 10. Siły sterujące  $Q_y$  (linia przerywana) i  $Q_z$  (linia ciągła) dla:  $V_{bo} = 250 \text{ m/s}$  i  $V_c = 20 \text{ m/s}$



Rys. 11. Przeciężenie poprzeczne bomby dla:  $V_{bo} = 250 \text{ m/s}$  i  $V_c = 20 \text{ m/s}$



#### 4. WNIOSKI

Powyższe przykłady pozwalają stwierdzić, że przedstawiony w pracy system skanująco-śledzący zastosowany w bombie wykazuje się dość dużą skutecznością przy przyjętych umiarkowanych wymiarach giroskopu. W obu przypadkach cel został przechwycony i nastąpiło jego śledzenie. W momencie przechwycenia celu zostało uruchomione naprowadzanie. Zastosowana metoda proporcjonalnej nawigacji ( $a_\sigma = 3,5$  i  $a_\varepsilon = 3,5$ ) zapewnia poprawne samonaprowadzanie bomby. Przy optymalnie dobranych współczynnikach wzmocnień regulatora w autopilocie bomby kierowanej, jak i obu przypadków skanowania, możliwe jest z wystarczającą dokładnością osiągnięcie ruchomego celu naziemnego. W przypadku spirali czas do momentu przechwycenia celu jest większy niż w przypadku rozety ale i tak jest to wynik zadowalający. Także błędy śledzenia w obu przypadkach są zadowalająco małe. Ważne jest to aby cel został przechwycony zanim zdąży wyjść poza strefę skanowania. W zastosowanej metodzie sterowanie osią giroskopu nie jest skomplikowane i pozwala na zastosowanie różnych algorytmów skanowania.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Koruba Z., Osiecki J.W.: *Budowa, dynamika i nawigacja pocisków raketowych bliskiego zasięgu*, Kielce, 1999.
2. Koruba Z., Osiecki J.W.: *Budowa, dynamika i nawigacja wybranych broni precyzyjnego rażenia*, Kielce, 2006.
3. Łojek W., Osiecki J.W.: *Koncepcja sterowania bombą lotniczą atakującą wskazany cel*. II Międzynarodowa Konferencja Uzbrojenia „Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia”. Waplewo, 27–29 października 1998. Materiały konferencyjne (ISBN 83-908620-2-6), cz. II, s. 209.
4. Osiecki J.W., Stefański K.: *Sterowanie urządzeniem namiarowym na podstawie trajektorii fazowych*. IX Konferencja Naukowo-Dydaktyczna „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania i łączności”. Gdynia-Władysławowo, 15-17 października 2003. Materiały konferencyjne AMW (ISBN 83-87280-60-7), t. II, s. 421–428.
5. Stefański K.: *Układ skanujący ograniczoną przestrzeń i automatycznie wyznaczający namiary celu*. III Konferencja Naukowa „Kierowanie ogniem systemów obrony powietrznej (przeciwlotnicze)”. Koszalin, 25–27 maja 2004. Materiały konferencyjne (ISBN 83-87280-70-4), s. 385–394.