

DYNAMIKA LOTU ZASOBNIKA Z OBROTOWYM NIESYMETRYCZNYM UKŁADEM HAMUJĄCO-STABILIZUJĄCYM

KAZIMIERZ MICHAŁEWICZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

1. Wstęp

Celem niniejszej pracy jest analiza wpływu obrotowego układu hamująco-stabilizującego ($h-s$) na parametry lotu zasobnika (korpusu) zrzucanego z nosiciela (rys. 1). Korpus traktowano jako układ mechaniczny sztywny [1, 3, 6, 8, 11] z obrotowym układem $h-s$ o określonej masie.

Rozpatrując dynamikę obiektu uwzględniono ruchy podłużne, poprzeczne i boczne ($U, V, W, \Phi, \Theta, \Psi$) korpusu oraz ruch względny układu $h-s$ (Φ_H) zakładając jednocześnie, że kąt pochylenia układu $h-s$ $\alpha_H = \text{const}$ (tzn., że nastąpiła deformacja układu $h-s$), a kąt odchylenia $\beta_H = 0$.

Równania ruchu w układzie współrzędnych związanych ze środkiem masy korpusu wyprowadzono w quasi-współrzędnych stosując równania Boltzmann-Hamela [8] dla układów mechanicznych o więzach holonomicznych.

Układy odniesienia i związki kinematyczne przyjęto zgodnie z [4, 8]. Wykonano przykładowe obliczenia, których wyniki pokazują charakter zmian parametrów ruchu korpusu po zrzucie z nosiciela oraz wpływ niesymetrycznego obrotowego układu $h-s$ na wielkość tych zmian.

2. Przyjęte układy odniesienia

Do opisu dynamiki zasobnika niezbędne są cztery [4, 8] układy odniesienia (zgodnie z PN-83 L-01010.01):

Wykaz ważniejszych oznaczeń

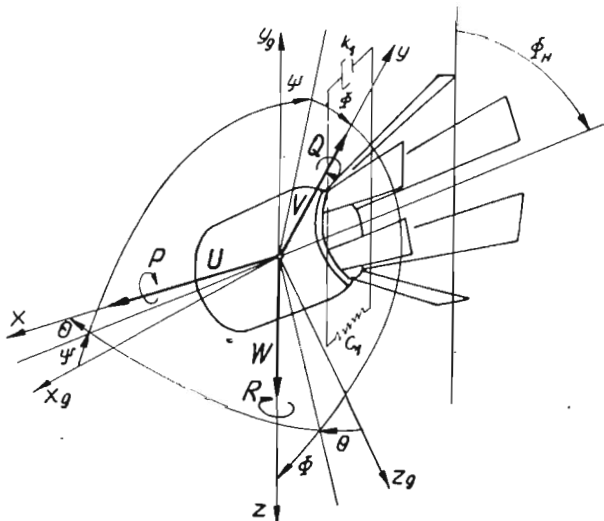
c_2 — sztywność zredukowana między korpusem a układem hamująco-stabilizującym;

g — przyspieszenie ziemskie;

$Ix_1, Iy_1, Iz_1,$

Ix_2, Iy_2, Iz_2 — osiowe momenty bezwładności korpusu i układu $h-s$;

- k_2 — tłumienie zredukowane między korpusem a układem $h-s$;
 l_s — odległość między SM korpusu a węzłem mocowania układu $h-s$;
 l_H — odległość między SM układu $h-s$ a węzłem;
 m_1 — masa korpusu;
 m_2 — masa układu $h-s$;
 L_B, L_H, M_B, N_B — aerodynamiczne momenty przechylający, pochylający, i odchylający korpusu i układu $h-s$;
 M_q — pochodna aerodynamiczna momentu pochylającego względem zmian prędkości kątowej pochylania korpusu;
 P, Q, R — prędkości kątowe przechylania, pochylania i odchylenia korpusu;
 U, V, W — prędkości SM korpusu w układzie $Oxyz$;
 V_c — prędkość całkowita;
 x_1, y_1, z_1 — współrzędne nieruchomego układu grawitacyjnego $Ox_1y_1z_1$;
 X_B, X_H — opór korpusu i układu $h-s$;
 X_q, X_{qH}, X_r, X_{rH} — pochodne aerodynamiczne oporu korpusu i układu $h-s$, względem zmian prędkości kątowych pochylania i odchylenia;
 Y_B, Y_H, Z_B, Z_H — aerodynamiczne siły boczna i nośna korpusu i układu $h-s$;
 $Y_q, Y_{qH}, Y_r,$
 Y_r — pochodne aerodynamiczne siły bocznej względem zmian prędkości kątowych pochylania i odchylenia;
 α — kąt natarcia korpusu;
 β — kąt ślizgu korpusu;
 Φ, Θ, Ψ — kąty przechylenia, pochyleńia i odchylenia korpusu od układu $Ox_gy_gz_g$;
 Φ_H — kąt przechylenia układu $h-s$ względem korpusu;
 ρ — gęstość powietrza.



Rys. 1. Analizowany obiekt oraz przyjęte układy odniesienia

- $Oxyz$ sztywno związany z poruszającym się korpusem (rys. 1),
- nieruchomy grawitacyjny $Ox_1y_1z_1$ związany z Ziemią,
- grawitacyjny $Ox_gy_gz_g$ związany ze SM korpusu, równoległy do układu $Ox_1y_1z_1$,
- prędkościowy $Ox_a y_a z_a$ związany z kierunkiem przepływu ośrodka.

Ruch zasobnika został opisany w centralnym układzie współrzędnych $Oxyz$ sztywno [8, 9, 10] związanym ze środkiem masy korpusu (rys. 1). Chwilowe położenie korpusu jako ciała sztywnego wyznaczono przez [2, 4, 8]:

- położenie środka masy $\bar{r}_1(x_1, y_1, z_1)$ mierzone względem nieruchomego układu $Ox_1y_1z_1$,
- quasi-eulerowskimi kątami obrotu korpusu Φ, Θ, Ψ określającego położenie układu związanego z bryłą $Oxyz$ względem grawitacyjnego układu $Ox_gy_gz_g$ związanego ze SM poruszającego się obiektu.

3. Model fizyczny obiektu

Rozpatrywanym obiektem jest korpus w kształcie walca zrzucony z nosiciela, hamowany przy pomocy kręcącego się układu $h-s$. Korpus traktowano jako układ mechaniczny, sztywny, osiowosymetryczny [3, 9].

Układ hamująco-stabilizujący przeznaczony jest do wyhamowania prędkości lotu korpusu do prędkości granicznej oraz do stabilizacji układu. Otwarty układ $h-s$ traktowano jako układ mechaniczny sztywny o określonej masie, osiowo niesymetryczny wykonujący obrót względem korpusu o kąt Φ_H . Założono jednocześnie, że nie wykonuje on wahań pochyłających i odchylających względem korpusu ($\alpha_H = \text{const}$; $\beta_H = 0$).

Charakterystyki aerodynamiczne, geometryczne i masowe uzyskano na drodze pomiarów.

W węzle łączącym korpus z układem $h-s$ działają dodatkowo siły tarcia oraz tłumienia i sprężystości [8, 11].

4. Model matematyczny

Równania ruchu obiektu otrzymano z równań Boltzmanna-Hamela [8, 9]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T^*}{\partial \omega_\mu} \right) - \frac{\partial T^*}{\partial \pi_\mu} + \sum_{r=1}^k \sum_{\alpha=1}^k \gamma_{\alpha\mu}^r \frac{\partial T^*}{\partial \omega_r} \omega_\alpha = Q_\mu^*, \quad (4.1)$$

gdzie:

- $\mu = 1, 2, \dots, k$ — ilość stopni swobody,
- ω_μ — quasi-prędkości,
- π_μ — quasi-współrzędne,
- T^* — energia kinetyczna w quasi-prędkościach,
- Q_μ^* — siły uogólnione,
- $\gamma_{\mu\alpha}^r$ — trójwskaźnikowe mnożniki Boltzmanna [8].

Dla przyjętego modelu równania ruchu obiektu mają następującą postać:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T^*}{\partial U} \right) - \frac{\partial T^*}{\partial V} R + \frac{\partial T^*}{\partial W} Q &= Q_u^*, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T^*}{\partial V} \right) + \frac{\partial T^*}{\partial U} R - \frac{\partial T^*}{\partial W} P &= Q_v^*, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T^*}{\partial W} \right) - \frac{\partial T^*}{\partial U} Q + \frac{\partial T^*}{\partial V} P &= Q_w^*, \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T^*}{\partial P} \right) - \frac{\partial T^*}{\partial V} W + \frac{\partial T^*}{\partial W} V - \frac{\partial T^*}{\partial Q} R + \frac{\partial T^*}{\partial R} Q &= Q_p^*, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T^*}{\partial Q} \right) + \frac{\partial T^*}{\partial U} W - \frac{\partial T^*}{\partial W} U + \frac{\partial T^*}{\partial P} R - \frac{\partial T^*}{\partial R} P &= Q_q^*, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T^*}{\partial R} \right) - \frac{\partial T^*}{\partial U} V + \frac{\partial T^*}{\partial V} U - \frac{\partial T^*}{\partial P} Q + \frac{\partial T^*}{\partial Q} P &= Q_r^*. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Ponadto dochodzi równanie opisujące obrót układu h - s względem korpusu:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T^*}{\partial \dot{\Phi}_H} \right) - \frac{\partial T^*}{\partial \Phi_H} = Q_{\dot{\Phi}_H}^*. \quad (4.4)$$

Energję kinetyczną korpusu wraz z układem h - s wyznaczono z zależności:

$$T = \frac{1}{2} \left(\int_{D_1} \mathbf{V} \mathbf{V} dm_1 + \int_{D_2} \mathbf{V} \mathbf{V} dm_2 \right). \quad (4.5)$$

Zakładając, że masy poszczególnych obszarów są stałe i $\alpha_H = \text{const}$, $\beta_H = 0$ energia kinetyczna ma postać:

$$\begin{aligned} T = \frac{1}{2} & [(m_1 + m_2)(U^2 + V^2 + W^2) + P^2(I_{x_1} + I_{x_2}) + \\ & + Q^2(I_{y_1} + I_{y_2}) + R^2(I_{z_1} + I_{z_2})] - QR I_{xy_2} - RPI_{xz_2} + \\ & - PQ I_{xy_2} + (VR - WQ) S_{x_2} + (PW - UR) S_{y_2} + (UQ - VP) S_{z_2} + \\ & + I_{IH}(A_2^2 + A_3^2) + I_{IH_x}(RA_2 - QA_3) + PI_{IH_y} A_3 + \\ & - PI_{IH_z} A_2 + S_{IH}(VA_2 + WA_3), \end{aligned} \quad (4.6)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} A_2 &= \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H \cos \Phi_H, \\ A_3 &= -\dot{\Phi}_H \sin \alpha_H \sin \Phi_H. \end{aligned}$$

Po wyznaczeniu pochodnych energii kinetycznej całego obiektu tj. korpusu i układu h - s oraz sił uogólnionych, równania ruchu dla przyjętego modelu przedstawiają się następująco:

Równanie sił na kierunek 0x:

$$\begin{aligned} & (m_1 + m_2)(\dot{U} - VR + QW) - Sx_2(R^2 + Q^2) + Sy_2(\dot{R} + PQ) + \\ & \quad + Sz_2(\dot{Q} + PR) + S_{I_H} \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H (R \cos \Phi_H + Q \sin \Phi_H) = \\ & = X_g + X_{gH} + X_B + X_H + X_p P + (X_q + X_{qH})Q + (X_r + X_{rH})R + \\ & \quad + X_{pH}(P + \dot{\Phi}_H). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Równanie sił na kierunek 0y:

$$\begin{aligned} & (m_1 + m_2)(\dot{V} + UR - WP) - Sy_2(R^2 + P^2) + Sx_2(\dot{R} + QP) + \\ & \quad + Sz_2(QR - \dot{P}) + S_{I_H} \sin \alpha_H (\ddot{\Phi}_H \cos \Phi_H - \dot{\Phi}_H^2 \sin \Phi_H + \\ & \quad - \dot{\Phi}_H P \sin \Phi_H) = Y_g + Y_{gH} + Y_B + Y_H + (Y_r + Y_{rH})R. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Równanie sił na kierunek 0z:

$$\begin{aligned} & (m_1 + m_2)(\dot{W} - UQ + VP) + Sx_2(-\dot{Q} + PR) + Sy_2(\dot{P} + QR) + \\ & \quad - Sz_2(Q^2 + P^2) + S_{I_H} \sin \alpha_H (-\ddot{\Phi}_H \sin \Phi_H - \dot{\Phi}_H^2 \cos \Phi_H + \\ & \quad + P \dot{\Phi}_H \cos \Phi_H) = Z_g + Z_{gH} + Z_B + Z_H + (Z_q + Z_{qH})Q. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Równanie momentów przechylających korpusu:

$$\begin{aligned} & (I_{x_1} + I_{x_2})\dot{P} + QR[(I_{z_1} + I_{z_2}) - (I_{y_1} + I_{y_2})] + \dot{Q}I_{xy_2} - Q^2I_{y_2} + \\ & \quad - (\dot{R} + QP)I_{xz_2} + S_{y_2}(\dot{W} - QU + VP) - S_{z_2}(\dot{V} + RU - PW) + \\ & \quad + I_{I_{H_x}} \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H (R \sin \Phi_H + Q \cos \Phi_H) + \\ & \quad - I_{I_{H_y}} \sin \alpha_H (\ddot{\Phi}_H \sin \Phi_H + \dot{\Phi}_H^2 \cos \Phi_H) + I_{I_{H_z}} \sin \alpha_H (\ddot{\Phi}_H \cos \Phi_H + \\ & \quad - \dot{\Phi}_H^2 \sin \Phi_H) - S_{I_H} \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H (W \cos \Phi_H + V \sin \Phi_H) = \\ & = L_{gH} + L_B + L_{HB} + L_p P + L_{\Phi_H}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Równanie momentów pochylających korpusu:

$$\begin{aligned} & (I_{x_1} + I_{x_2})PR + (I_{y_1} + I_{y_2})\dot{Q} - I_{xy_2}(\dot{P} + RQ + P^2) + \\ & \quad + I_{xz_2}(P^2 - R^2) + I_{yz_2}PR + Sx_2(UQ - \dot{W} - PV) + Sz_2(\dot{U} + WQ - RV) + \\ & \quad + I_{I_{H_x}} \sin \alpha_H (\ddot{\Phi}_H \sin \Phi_H + \dot{\Phi}_H^2 \cos \Phi_H - P \dot{\Phi}_H \sin \Phi_H) + \\ & \quad + R \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H (I_{I_{H_z}} \cos \Phi_H - I_{I_{H_y}} \sin \Phi_H) + \\ & \quad + S_{I_H} U \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H \sin \Phi_H = M_{gH} + M_B + M_{HB} + M_q Q - M_H \frac{l_s}{l_H}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Równanie momentów odchylających korpusu:

$$\begin{aligned} & (I_{y_1} + I_{y_2} - I_{x_1} - I_{x_2})PQ + (I_{z_1} + I_{z_2})\dot{R} + \\ & \quad + I_{xy_2}(Q_2 - P_2) + I_{xz_2}(-\dot{P} + QR) - I_{yz_2}(\dot{Q} + PR) + \\ & \quad + Sx_2(\dot{V} + UR - PW) + Sy_2(-\dot{U} + VR - QW) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + I_{I_{Hx}} \sin \alpha_H (\ddot{\Phi}_H \cos \Phi_H - \dot{\Phi}_H^2 \sin \Phi_H + \dot{\Phi}_H P \sin \Phi_H) + \\
 & + Q \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H (I_{I_{Hy}} \sin \Phi_H - I_{I_{Hz}} \cos \Phi_H) + \\
 & + S_{I_H} U \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H \cos \Phi_H = N_{gH} + N_B + N_{HB} + N_r R - N_H \frac{l_s}{l_H}.
 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Równanie momentów przechylających układu h - s :

$$\begin{aligned}
 & \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H \{ \sin \Phi_H \{ V S_{I_H} + R I_{I_{Hx}} - P I_{I_{Hz}} + I_{I_H} \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H \cos \Phi_H + \\
 & - [\dot{V} S_{I_H} + \dot{R} I_{I_{Hx}} - \dot{P} I_{I_{Hz}} + I_{I_H} \sin \alpha_H (\ddot{\Phi}_H \cos \Phi_H + \\
 & - \dot{\Phi}_H^2 \cos \Phi_H) \} \} + \cos \Phi_H \{ (W S_{I_H} + P I_{I_{Hy}} - Q I_{I_{Hx}} + \\
 & - I_{I_H} \dot{\Phi}_H \sin \alpha_H \sin \Phi_H) - [\dot{W} S_{I_H} + \dot{P} I_{I_{Hy}} - \dot{Q} I_{I_{Hx}} + \\
 & - I_{I_H} \sin \alpha_H (\ddot{\Phi}_H \sin \Phi_H + \dot{\Phi}_H^2 \cos \Phi_H) \} \} = L_H + L_{BH} + \\
 & + L_{PH} (P + \dot{\Phi}_H) - L_{\Phi_H}.
 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Siły i momenty sił pochodzące od siły grawitacji $X_g, Y_g, Z_g, X_{gH}, Y_{gH}, Z_{gH}, L_{gH}, M_{gH}, N_{gH}$ przedstawiono w [10].

Siły i momenty sił aerodynamicznych [4, 5, 7], pomierzone w układzie prędkościowym $Ox_a y_a z_a$ transformowane do układu związanego przedstawiono w [8, 9, 10].

Momenty powstałe na skutek oddziaływania układu h - s na korpus:

$$\begin{aligned}
 L_{HB} &= P_{HB} \cdot r_H, \\
 M_{HB} &= (Z_H + Z_B) l_s - (X_H - X_B) l_s \sin \alpha_H, \\
 N_{HB} &= -(Y_B + Y_H) l_s.
 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Momenty powstałe na skutek oddziaływania korpusu na układ h - s :

$$\begin{aligned}
 L_{BH} &= -P_{HB} \cdot r_H, \\
 M_{BH} &= -(Z_H + Z_B) l_H + (X_H - X_B) l_H \sin \alpha_H, \\
 N_{BH} &= (Y_B + Y_H) l_H.
 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Moment powstały na skutek działania sił sprężystości i tłumienia w węźle wynosi:

$$L_{\Phi_H} = C_2 \Phi_H + k_2 \dot{\Phi}_H. \quad (4.16)$$

Pochodne aerodynamiczne [4, 5, 8] korpusu i układu h - s wyznaczono z zależności przedstawionych w [8, 9, 10].

Kierunek opływu ośrodka z prędkością V_c określono względem układu związanego Ox_yz kątami natarcia α i ślizgu β [4, 5, 8, 9, 10]. Powyższy układ równań uzupełniono równaniami związków kinematycznych [4, 5, 8, 9, 10].

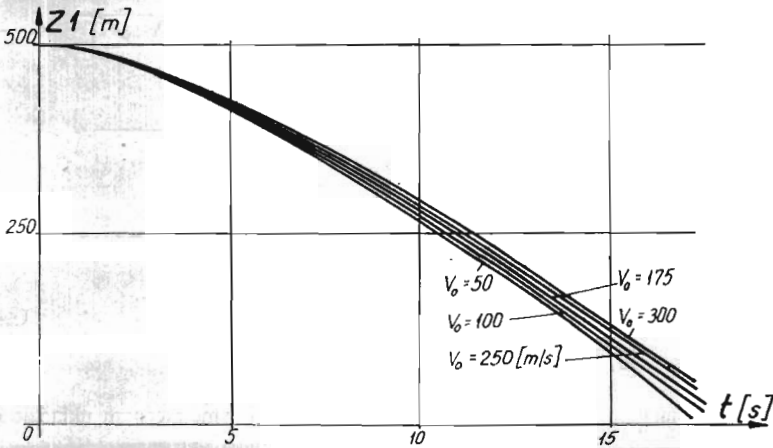
5. Analiza numeryczna

Rozwiązanie równań 4.7÷4.13 wykonano na komputerze IBM XT, wykorzystując zmodyfikowaną metodę Mersona. Opracowany program ma na celu zbadanie wpływu parametrów lotu nosiciela i parametrów konstrukcyjnych obiektu na tor lotu $z_1(x_1)$ i inne wielkości charakteryzujące ruch obiektu na torze.

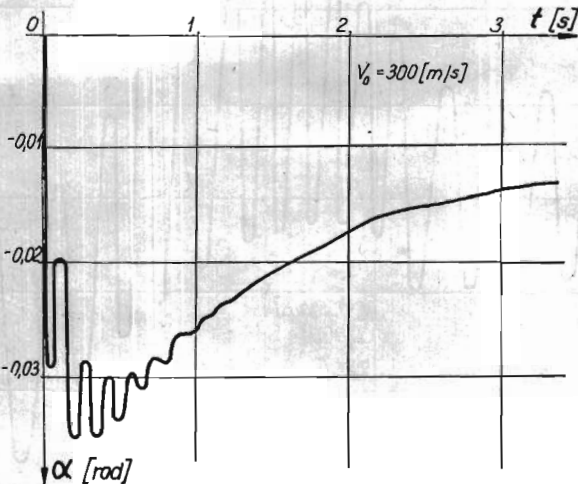
Charakterystyczne wyniki analizy numerycznej badanego modelu przedstawiono na rys. 2÷9 w formie wykresów.

Zwiększenie prędkości rzutu zasobników V_0 powoduje:

- zwiększenie zasięgu x_1 , ale jego przyrost jest coraz mniejszy,
- mniejszą utratę wysokości $z_1(t)$ rys. 2,
- zwiększenie odległości względnej $L(t)$ między zasobnikiem a nosicielem,
- szybszy spadek prędkości całkowitej $V_c(t)$,
- powolniejszy spadek kąta pochylenia $\theta(t)$ w początkowej fazie lotu,
- zwiększenie oscylacji kąta pochylenia $\theta(t)$ w początkowej fazie lotu,
- zwiększenie częstości i amplitudy wahań kąta natarcia $\alpha(t)$.



Rys. 2. Zmiana wysokości lotu środka masy zasobnika w funkcji czasu $z_1(t)$

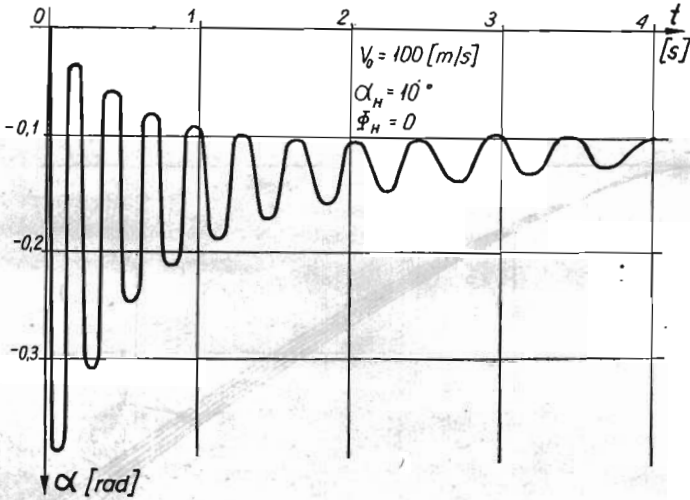


Rys. 3. Oscylacje kąta natarcia zasobnika $\alpha(t)$ w początkowej fazie lotu, dla $V_0 = 300$ [m/s]

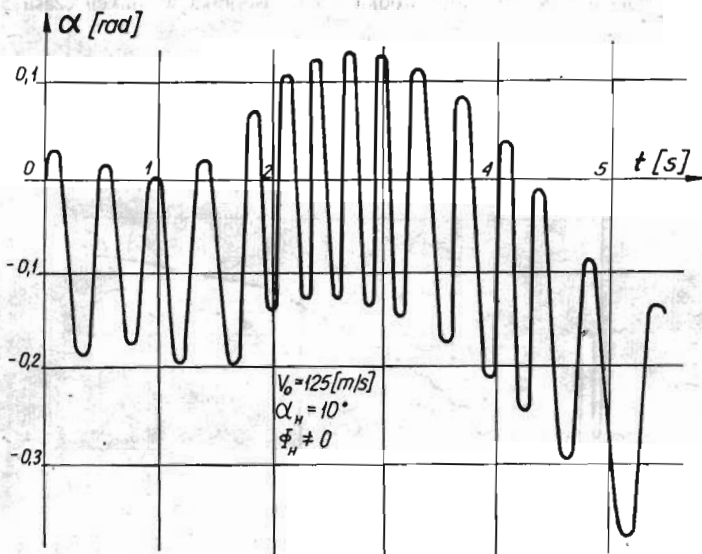
Zasobniki zrzucające z mniejszą prędkością V_0 szybciej osiągają podłoże. Początkowa prędkość zrzutu nie ma wpływu na czas osiągnięcia granicznej prędkości opadania V_{gr} oraz na osiągnięcie pionowego kąta pochylenia $\theta_{gr} = 90^\circ$.

W początkowej fazie lotu zasobnik może mieć chwilowo dodatni kąt pochylenia θ co może mieć wpływ na wystąpienie kolizji z nosicielem.

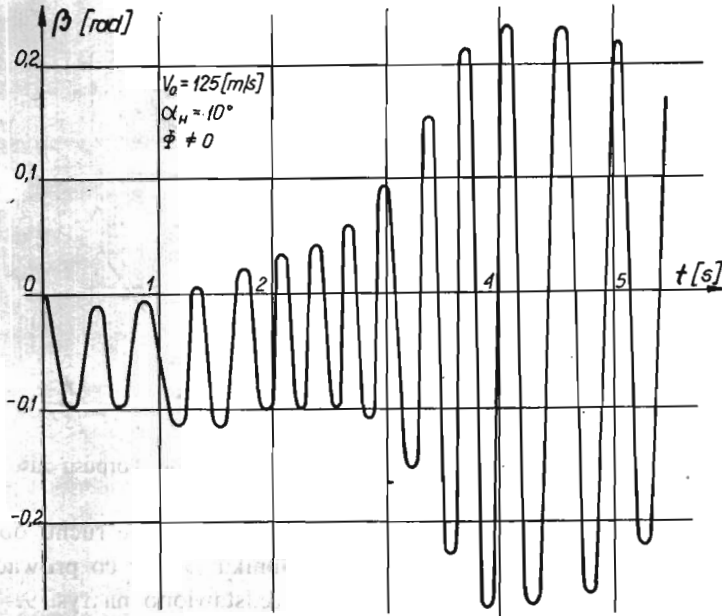
Częstość oscylacji kąta natarcia $\alpha(t)$ maleje w funkcji czasu lotu (rys. 3).



Rys. 4. Oscylacje kąta natarcia zasobnika $\alpha(t)$, przy niesymetrycznym układzie $h-s$

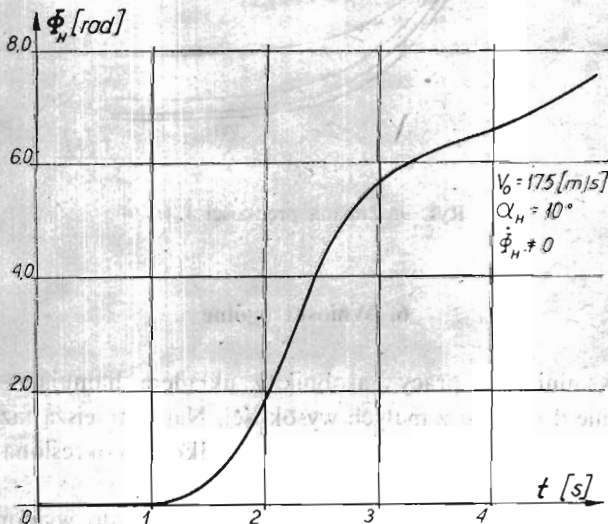


Rys. 5. Oscylacje kąta natarcia zasobnika $\alpha(t)$ przy obracającym się niesymetrycznym układzie $h-s$

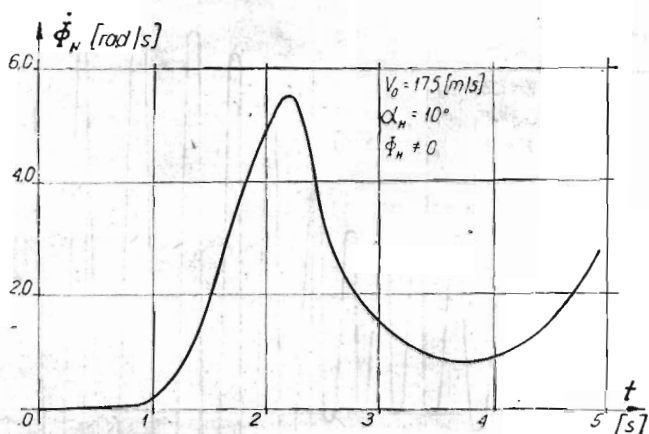


Rys. 6. Oscylacje kąta ślizgu zasobnika $\beta(t)$ przy obracającym się niesymetrycznym układzie h - s

Wprowadzenie niesymetryczności układu hamująco-stabilizującego $\alpha_H = 10^\circ$ powoduje duży wzrost amplitudy wahań α (rys. 4). Rozłączenie układu hamująco-stabilizującego $\Phi_H \neq 0$ od korpusu wyrobu powoduje dodatkowe zakłócenie ruchu. Amplitudy wahań kątów natarcia α i ślizgu β znacznie rosną (rys. 5 i 6). Układ h - s zaczyna wykonywać obrót o kąt Φ_H (rys. 7) z prędkością kątową $\dot{\Phi}_H$ (rys. 8).

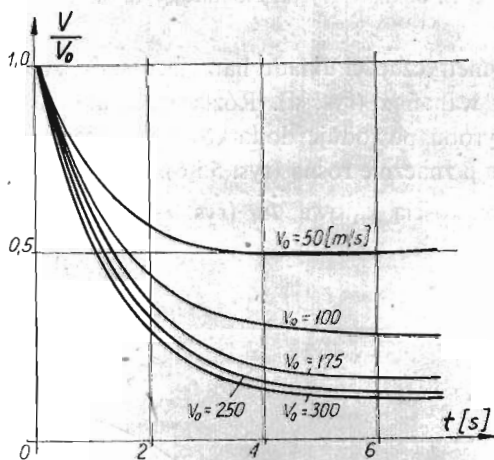


Rys. 7. Zmiana kąta obrotu układu h - s $\Phi_H(t)$ względem korpusu zasobnika



Rys. 8. Zmiana prędkości kątowej układu $h-s$ $\dot{\Phi}_H(t)$ względem korpusu zasobnika

Luźno obracający się układ $h-s$ niesymetryczny nie przekazuje ruchu obrotowego na korpus zasobnika. Powoduje to wzrost wahań zasobnika (α i β) co prowadzi do utraty stabilizacji. Zmianę prędkości względnej układu przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Zmiana prędkości $V_c(t)$

6. Wnioski ogólne

Analizowany w niniejszej pracy zasobnik z układem hamująco-stabilizującym ma zastosowanie głównie do zrzuca z małych wysokości. Najistotniejszą fazą ruchu zasobnika jest lot w początkowym okresie, gdyż zmniejszenie prędkości o określoną wartość powoduje zakrzywienie toru lotu obiektu.

Sprężysty układ hamująco-stabilizujący wykorzystywany do wyhamowania prędkości ruchu zasobnika charakteryzuje się:

- zmniejszeniem współczynnika oporu $C_x(M)$ przy wzroście prędkości lotu,
- zasobnik osiąga szybko graniczną prędkość opadania V_{gr} , niezależnie od prędkości zrzutu V_0 ,
- szybko tłumia wahania zasobnika,
- niesymetryczny — powoduje powstanie ruchu obrotowego oraz znaczne wahania układu.

Analiza dynamiki lotu zasobnika ze sprzężonym układem $h-s$ pozwoliła stwierdzić, że istnieje sprzężenie między parametrami ruchów symetrycznych i antysymetrycznych, co ma istotny wpływ na ruch układu.

Powyższa analiza pozwoliła ustalić podstawowe charakterystyki i zależności w przypadku zrzutu takich układów z samolotu. Wyniki uzyskane z przeprowadzonej analizy zostały potwierdzone podczas badań w locie na obiektach rzeczywistych.

Literatura

1. R. H. CANON jr., *Dynamika układów fizycznych*, WNT, Warszawa 1973.
2. S. DUBIEL, *Konstrukcja rakiet. Cz. I. Przeciżenia*, WAT Warszawa 1980.
3. Z. DŻYGADŁO, A. KRZYŻANOWSKI, E. PIOTROWSKI, *Dynamika lotu osiowosymetrycznego ciała ze sztywnym urządzeniem hamującym zrzuconego z samolotu*, Biuletyn WAT nr 11 (255), Warszawa 1973.
4. B. ETKIN, *Dynamics of Atmospheric Flight*, John Wiley, New York 1972.
5. W. FISZDON, *Mechanika lotu. cz. I i II*, PWN Łódź—Warszawa 1961.
6. R. GUTOWSKI, W. A. ŚWIETLICKI, *Dynamika i drgania układów mechanicznych*, PWN Warszawa 1986.
7. S. F. HOERNER, *Aerodynamics Drag*, Ohio 1951.
8. J. MARYNIAK, *Dynamiczna teoria obiektów ruchomych*, Praca naukowa PW, Mechanika nr 32. WPW Warszawa 1975.
9. K. MICHAŁEWICZ, *Dynamika lotu zasobnika lotniczego z połączonym przegubowo hamulcem aerodynamicznym, zrzuconego z samolotu*, Mechanika Teoretyczna i Stosowana nr 2, 17. Warszawa 1979.
10. K. MICHAŁEWICZ, *Dynamika lotu zasobnika z obrotowym niesymetrycznym układem hamująco-stabilizującym*, Opracowanie ITWL BT nr 8782/I, Warszawa 1987.
11. S. ЗИЕМБА, *Аналiза дргаń*, Tom I i II, PWN, Warszawa 1957.

Резюме

ДИНАМИКА ПОЛЁТА КОНТЕЙНЕРА С ПОВОРОТНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ТОРМОЗНО-СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

В настоящей работе проанализирована проблема влияния поворотной тормозно-стабилизирующей системы ($m-c$) на параметры полёта контейнера. Учтены продольные, поперечные и боковые движения ($U, V, W, \Phi, \Theta, \Psi$) корпуса контейнера, а также системы $m-c$ (Φ_H).

Определено уравнение движения, применяя уравнение Больцмана-Хамела, для механических систем с голономными связями.

Представлены результаты численного анализа, которые указывают на характер изменения параметров движения корпуса, а также влияние несимметрической поворотной системы $m-c$ на величину этих изменений.

S u m m a r y

FLIGHT DYNAMICS OF AN AIRDROP CONTAINER WITH A ROTARY ASYMMETRIC BRAKE-STABILIZING SYSTEM

We consider the influence of a rotary brake-stabilizing system (h -s) on flight characteristics of a container.

Longitudinal, lateral and side motions ($U, V, W, \Phi, \Theta, \Psi$) of the container body as well as h -s system rotation (Φ_n) have been taken into account.

Equations of the motion have been determined by the use of Boltzmann — Hamel equations for material systems with holonomic constraints.

Numerical analysis results that illustrate nature of the changes of the body motion parameters as well as the influence of asymmetric, rotating h -s system on the values of these changes have also been presented.

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 4 listopada 1987 roku.
