XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom III

KKA 2005

Redaktorzy:
Zdzisław Bubnicki
Roman Kulikowski
Janusz Kacprzyk

XV Krajowa Konferencja Automatyki
Tom III

Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

ORGANIZATOR
Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
WSPÓŁORGANIZATORZY
Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓŁORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

KOMITET PROGRAMOWY

Przewodniczący	Zdzisław BUBNICKI
Zastępca Przewodniczącego	Roman KULIKOWSKI

CZŁONKOWIE

Stanisław BAŃKA	Michał BIAŁKO
Mikołaj BUSŁOWICZ	Władysław FINDEISEN
Ryszard GESSING	Henryk GÓRECKI
Jakub GUTENBAUM	Jerzy JÓZEFCZYK
Stanisław KACZANOWSKI	Tadeusz KACZOREK
Janusz KACPRZYK	Jerzy KLAMKA
Józef KORBICZ	Zbigniew KOWALSKI
Krzysztof KOZŁOWSKI	Juliusz L. KULIKOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI	Kazimierz MALANOWSKI
Krzysztof MALINOWSKI	Wojciech MITKOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI	Władysław PEŁCZEWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA	Leszek RUTKOWSKI
Stanisław SKOCZOWSKI	Roman SŁOWIŃSKI
Jerzy ŚWIĄTEK	Andrzej ŚWIERNIAK
Ryszard TADEUSIEWICZ	Piotr TATJEWSKI
Krzysztof TCHOŃ	Leszek TRYBUS
Jan WĘGLARZ	Andrzej P. WIERZBICKI

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący	Roman KULIKOWSKI
Zastępcy Przewodniczącego	Janusz KACPRZYK
	Stanisław KACZANOWSKI
	Tadeusz KACZOREK
	Krzysztof MALINOWSKI
Członkowie	Roman OSTROWSKI
	Tadeusz PUCHAŁKA
	Dariusz WAGNER
Sekretarze naukowi	Jan STUDZIŃSKI
	Jan W. OWSIŃSKI

ISBN 83-89475-02-2

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

ZASTOSOWANIA TECHNICZNE – CZĘŚĆ A

Sterowanie statkami, pojazdami, lotem

ANALIZA METOD STEROWANIA MAŁYCH OBIEKTÓW LATAJĄCYCH

Robert GŁĘBOCKI, Ryszard VOGT

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa, e-mail:rgleb@meil.pw.edu.pl

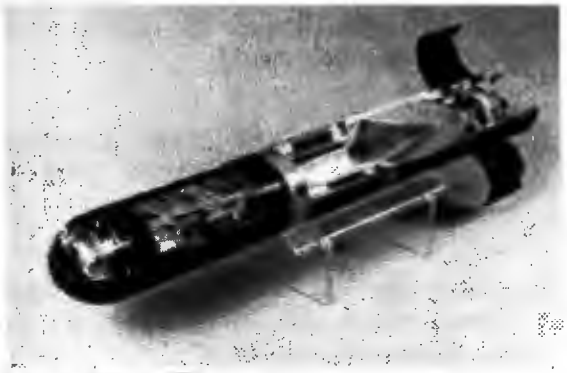
Streszczenie: W niniejszej pracy zawarto analizę metod sterowania lotem małych rakiet i pocisków sterowanych. Przedstawiono informacje ogólne dotyczące problemów spotykanych w tego typu konstrukcjach i metod ich rozwiązywania jak również własne doświadczenia autorów z tego typu prac.

Słowa kluczowe: Automatyczne sterowanie lotem, pociski inteligentne.

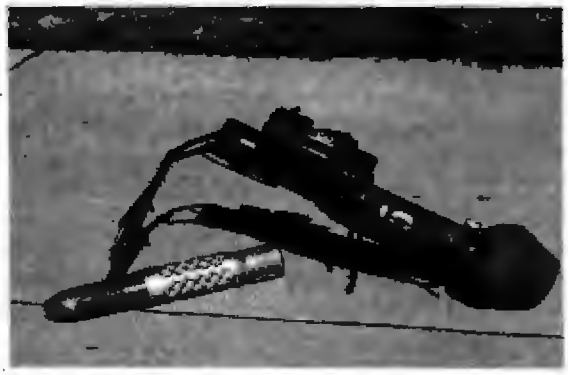
1. PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU

W pracy przedstawiono analizę metod sterowania lotem małych obiektów zaliczanych do klasy tzw. pocisków inteligentnych. Badania te w dużym stopniu oparte są o doświadczenia z prac badawczych prowadzonych przez autorów. Jednym z głównych celów rozwoju metod sterowania małych pocisków, obok doskonalenia dokładności i eliminacji udziału człowieka, jest miniaturyzacja sterującej aparatury pokładowej umożliwiająca obniżenie jej kosztów oraz zmniejszenie masy i wymiarów sterowanych pocisków. Takiemu rozwojowi techniki sterowania tych obiektów sprzyja ogólny postęp opto-elektroniki, ale dotyczy to głównie rozwiązywania zadań nawigacyjnych i przetwarzania sygnałów. Sygnały te jednak muszą być przetworzone na odpowiednie wymuszenia sterujące najczęściej przez urządzenia elektro-mechaniczne lub elektro-pneumatyczne, których zasada działania, zapotrzebowanie na energię, a także masa nie podlegały tak rewolucyjnym zmianom jak opto-elektronika. Stąd, aby sprostać rosnącym wymaganiom stawianym przy projektowaniu nowej generacji pocisków małego kalibru, należało szukać nowych metod, różniących się charakterem sił wymuszających oraz sposobem ich oddziaływania na obiekt.

W rozwoju metod sterowania, a w szczególności sposobów działania sił sterujących na obiekt, znaczące efekty w postaci zmniejszenia masy aparatury pokładowej uzyskano stosując stery dwupołożeniowe, co eliminowało konieczność stosowania w sterach odpowiednich serwomechanizmów. Znacznie większe efekty uzyskano zmniejszając ilość kanałów sterowania niezbędnych do przestrzennego sterowania lotem. Układy wykonawcze sterowania bazujące na elementach mechanicznych, elektrycznych i pneumatycznych, w stosunku do elementów optoelektronicznych, zajmują znacznie więcej miejsca, posiadają większą masę, a ponadto zużywają dużo energii. Stąd eliminacja ilości kanałów sterowania zmniejsza w odpowiedniej proporcji masę nie tylko tych układów, ale również źródła energii np. baterii elektrycznej.



Rys. 1. Pocisk STRIX



Rys. 2. Pocisk Dragon

Najczęściej stosuje się w małych pociskach dwa kanały sterowania: pochylenia i odchylenia, eliminując kanał przechylenia. Jednak najbardziej zaawansowane sterowanie lotem przestrzennym, pod względem nowoczesności rozwiązań, jest sterowanie jednokanałowe nieciągłe: skokowo i okresowo-zmienne lub impulsowe. Przy obu tych typach sterów pocisk wykonuje ruch wirowy, a częstość wymuszeń sterujących zależy od częstotliwości obrotów pocisku. Na tym podobieństwo obu typów sterów się kończy. Stery o działaniu skoko-

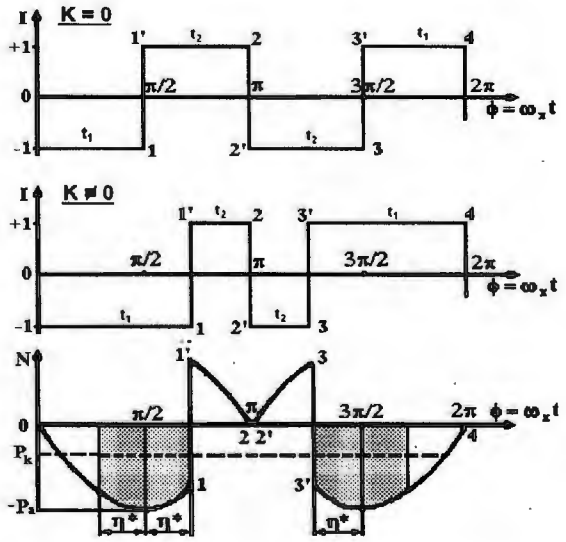
Badania prowadzono w ramach grantu MNiI
Nr 0T00A02826

wo i okresowo-zmiennym należą do sterów pośredniego działania, niezależnie od tego, czy wytworzone siły sterujące są siłami aerodynamicznymi, czy też gazodynamicznymi. Zadaniem sterów pośredniego działania jest przechylenie i pochylenie osi obiektu względem wektora prędkości lotu o odpowiedni kąt natarcia i ślizgu w taki sposób aby związane z obiektem siły np. aerodynamiczna siła nośna i boczna spowodowały wymaganą zmianę kierunku lotu. Jest to klasyczny sposób sterowania stosowany do sterowania lotem samolotów i większości pocisków rakietowych.
Stery o działaniu bezpośrednim charakteryzują się tym, że wytworzone przez nie siły sterujące, czy składowe sił sterujących prostopadłe do osi wzdłużnej pocisku nie wytwarzają momentu, gdyż przyłożone są w środku masy powodując zmianę kierunku jego lotu. W małych pociskach najczęściej stosowane są odpowiednio rozmieszczone silniki rakietowe o krótkim impulsowym działaniu. Przykładami takich rozwiązań są pociski „Dragon", „Strix" (rys. 1 i 2), czy opracowywany w Polsce „Rad". Stery o działaniu bezpośrednim muszą zatem wytworzyć, dla uzyskania odpowiedniego efektu siły o znacznie większej wartości niż w przypadku sterów pośredniego działania. Zapewniają jednak znacznie mniejsze opóźnienie w działaniu.

2. JEDNOKANAŁOWE SKOKOWO I OKRESOWO-ZMIENNE STEROWANIE LOTEM PRZESTRZENNYM.

Stery te działają zazwyczaj jako stery pośredniego działania. Ich zadaniem jest zatem wytworzenie odpowiedniego momentu powodującego odchylenie lub pochylenie obiektu względem wektora **V**, niezależnie od charakteru siły sterującej. Mogą to być więc stery aerodynamiczne lub gazodynamiczne np. wychylna dysza silnika rakietowego.
Stery są dwustanowe i przyjmują dwa skrajne położenia, dodatnie lub ujemne o stałej amplitudzie. Poważnie upraszcza to ich mechanizm napędowy. Tak wiec siła sterująca i wytworzony przez nią moment działa w jednej płaszczyźnie obiektu i przyjmuje w stanach ustalonych dodatnią lub ujemną stałą wartość. Możliwość sterowania w obu płaszczyznach lotu uzyskuje się poprzez odpowiednie relacje między zmianą położenia sterów a ruchem obrotowym obiektu wokół osi wzdłużnej.
Sterowanie położeniem sterów dodatkowo komplikuje konieczność uzyskania wymaganej jakości sterowania i związanym z tym prawdopodobieństwem trafienia. Uzyskanie odpowiedniej jakości sterowania możliwe jest tylko wtedy, gdy składowe średniego momentu sterującego w obu kanałach – wysokości i kierunku będą proporcjonalne do „wyjściowych" sygnałów sterujących. Ponieważ proces sterowania lotem odbywa się w układzie biegunowym, wartość średniej siły sterującej określa sygnał „wyjściowy" sterujący K, a kierunek jego działania kąt fazowy Φ. Np. przy Φ =0° średni moment sterujący działa w pionowej płaszczyźnie lotu, zmieniając jego wysokość, a w zakresie 0<Φ<90° zmiana kierunku lotu odbywa się w obu jego płaszczyznach.

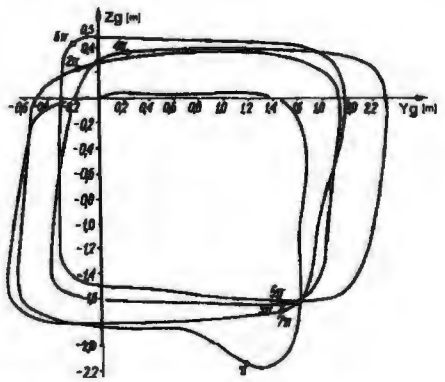
Wymagany efekt sterowania uzyskano wprowadzając tzw. częstotliwościową linearyzację skokowo zmiennego sygnału I sterującego położeniem dwustanowych sterów, zsynchronizowany z prędkością obrotową ω_{x1} wirującego obiektu. Przy przyjętej logice sterowania ciągły sygnał sterujący K przetwarzany jest na sygnał skokowo i okresowo - zmienny I, sterujący położeniem dwupołożeniowych sterów (rys. 3). Sygnał I powinien zapewnić proporcjonalność między średnią siłą sterującą $P_{kśr}$ a sygnałem K oraz zgodność kierunku działania tej siły z płaszczyzną fazową ϕ. Podstawowe znaczenie przy takim sterowaniu ma synchronizacja czasowa częstotliwości i fazy zmian sygnału I. Sygnał sterujący położeniem sterów jest funkcją I (K, ϕ, φ) gdzie K jest wypadkowym sygnałem sterującym a kąt φ kątem obrotu pocisku względem osi wzdłużnej. Faza ϕ zmian sygnału I zależy natomiast od stosunku wartości sygnałów Kp, Ko w obu płaszczyznach lotu.



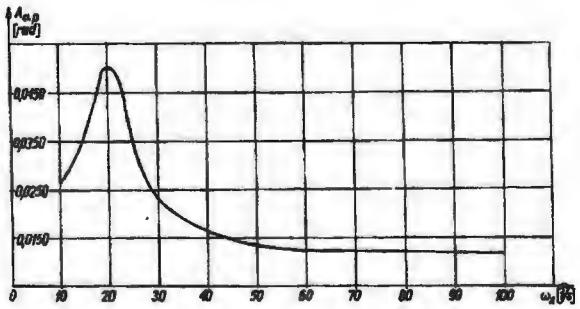
Rys. 3. Sygnał sterujący I i odpowiadający mu rzut siły sterującej na oś fazową N.

Siła sterująca wytwarzana jest w jednej płaszczyźnie obiektu przechylonej o kąt ϕ. Efekt sterowania w obu płaszczyznach lotu uzyskuje się zatem poprzez odpowiednią zmianę kąta fazowego ϕ.
Stąd stery i sygnał sterujący I ich położeniem, zmieniają swoje położenie czterokrotnie podczas jednego obrotu pocisku. Tak więc częstotliwość pracy sterów jest równa dwukrotnej częstotliwości obrotów pocisku $\omega_s = 2*\omega_{x1}$. Przy sygnale sterującym K=0 czasy wypełnienia t_1 i t_2 są jednakowe, a średnia siła sterująca jest równa 0. Przy wartości sygnału K≠0 następuje odpowiednie przesunięcie czasów wypełnienia sygnałów t_1 i t_2 w taki sposób aby średnia siła sterująca w czasie obrotu pocisku była proporcjonalna do sygnału K.
Takie działanie sterów wymusza na obiekcie nawet przy zerowych sygnałach sterujących $K = \sqrt{Kp^2 + Ko^2} = 0$ bardzo złożony ruch oscylacyjny środka masy i wokół środka masy (rys. 4). Amplituda tych oscylacji (rys. 5) bardzo silnie zależy od stosunku częstotliwości pracy sterów do częstotliwości

krytycznej ω_{kr}. Natomiast częstotliwość pracy sterów $\omega=2\omega_x$ gdzie ω_x jest prędkością kątową obrotów pocisku.



Rys. 4. Ruch środka masy rakiety wirującej w płaszczyźnie Yg, Zg wymuszony skokowo i okresowo-zmiennym momentem kierującym przy zerowych wyjściowych sygnałach sterujących.



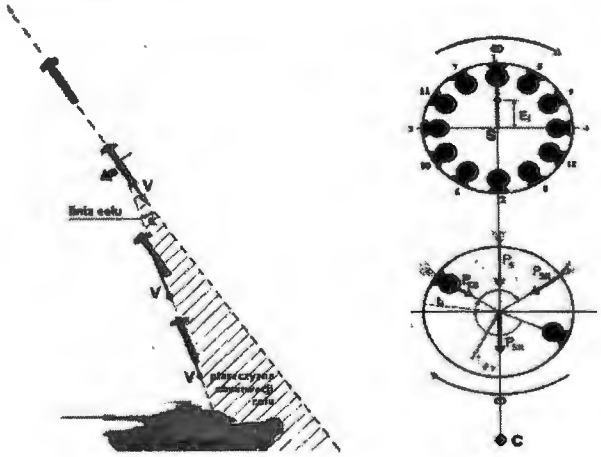
Rys. 3. Amplituda wahań rakiety wokół środka masy w płaszczyźnie pionowej wymuszonych okresowo i skokowo-zmiennym momentem kierującym w zależności od częstości pracy sterów ω.

3. DYNAMIKA RUCHU POCISKÓW STEROWANYCH JEDNOKANAŁOWO ZE STERAMI IMPULSOWYMI.

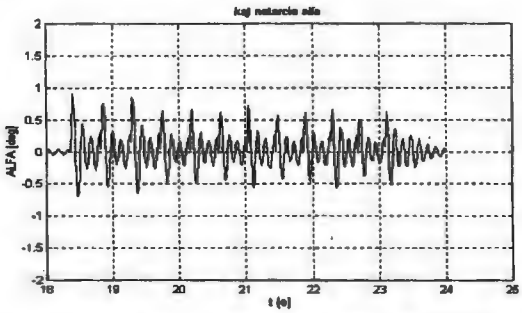
W opisywanym rozwiązaniu, podobnie jak w poprzednim rozdziale, pociski wirują w czasie lotu sterowanego. W rozwiązaniu tym sterowanie jest realizowane za pomocą jednorazowych rakietowych silników korekcyjnych rozmieszczonych promieniście wokół środka ciężkości pocisku. Uruchomienie silnika powoduje powstanie impulsu siły skierowanego prostopadle do osi symetrii pocisku i skierowanego wzdłuż prostej przechodzącej przez jego środek ciężkości (rys. 6).

Zadziałanie silnika oddziaływuje bezpośrednio na zmianę wektora prędkości lotu pocisku zarówno, co do kierunku jak i co do wartości. Precyzyjne naprowadzanie na cel realizuje się poprzez kolejne odpalanie kilku silników.

Decyzja o odpalaniu silnika oraz częstość zwana krotnością odpalania zależy od zadanego sygnału sterującego wyznaczonego na podstawie sygnału uchybu. Krotność odpalania, oznaczająca ilość obrotów pocisku między kolejnymi odpaleniami silników, zwiększa się w odpowiedni sposób z wartością sygnału K. Natomiast kierunek działania impulsu sił sterujących od kolejnych silników zależy od momentu odpalenia wybranego silnika. Tak więc momenty odpalania silników zależą od kąta fazowego ϕ_m położenia celu, położenia kolejno odpalanego silnika na obwodzie pocisku, kąta φ i prędkości obrotowej ω_x pocisku.



Rys. 6. Zasada sterowania pociskiem przy pomocy silników rakietowych.



Rys. 7. Zmiany kąta natarcia przy krotności N=3

Czas działania silnika t_k powinien być możliwie krótki. Odpowiednie badania przeprowadzone przez autorów wykazały, że czas ten nie powinien być większy od ¼ okresu obrotu pocisku. Impuls sterujący silnika powoduje w tym czasie odpowiednią zmianę kierunku lotu pocisku, za którą nie nadąża położenie jego osi symetrii. Pojawiaj się zatem kąty natarcia i ślizgu, które przy odpowiedniej stateczności pocisku oscylacyjnie zanikają w czasie. Czas ten zależy od krotności odpalania N i prędkości kątowej obrotu pocisku. Najkrótszy jest przy N=1. Najczęściej nawet ekstremalne amplitudy kątów natarcia i ślizgu przy tym sterowaniu nie są duże (rys. 7) i nie powodują znaczących zakłóceń np. w pomiarach położenia celu przez głowicę śledzącą. Jednak w pewnych warunkach (krotności N, prędkości obrotowej ω_x, i prędkości lotu V) musi wystąpić zjawisko rezonansu i kąty natarcia i ślizgu osiągają znacznie większe wartości.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Z rozwojem metod sterowania kierunkiem lotu, polegającym m. in. na stosowaniu nieciągłych sterów (dwupołożeniowych lub impulsowych), komplikują się algorytmy sterowania, a przede wszystkim, bardzo złożona

jest dynamika sterowanego ruchu obiektu. Skokowo i okresowo-zmienne, podobnie jak impulsowe, siły i momenty sterujące wymuszają ruchy oscylacyjne wokół środka masy i środka masy niezależnie od wartości wejściowych sygnałów sterujących. Oscylacje te pogarszają jakość sterowania. Najbardziej złożone pod względem logicznym i dynamicznym jest jednokanałowe sterowanie, zarówno pośrednie skokowo i okresowo-zmienne, jak i bezpośrednie - impulsowe.

2. Jednokanałowe dwupołożeniowe okresowo-zmienne sterowanie, przy odpowiedniej strukturze sygnału sterującego położeniem sterów i prędkości ruchu wirowego pocisku, umożliwia sterowanie lotem w obu płaszczyznach lotu z wymaganą dokładnością. Uzyskanie wymaganej jakości sterowania możliwe jest dzięki zapewnieniu przez algorytm sterowania proporcjonalności między średnią siłą sterującą, a zadanymi wejściowymi sygnałami sterującymi.

Skokowo i okresowo-zmienny charakter zmian wartości sił i momentów sterujących, w połączeniu z ruchem wirowym pocisku wymusza bardzo złożone ruchy oscylacyjne wokół środka masy i środka masy. Amplituda tych oscylacji zależy od struktury i parametrów algorytmów sterowania oraz właściwości i warunków lotu pocisku. Największy wpływ na wartość oscylacji ma stateczność dynamiczna pocisku oraz częstotliwość zmian wartości sił sterujących. Istnieje pewna częstość krytyczna pracy sterów, przy której występuje zjawisko rezonansu i oscylacje wokół środka masy i środka masy osiągają tak duże wartości, że sterowanie lotem staje się niemożliwe. Częstość krytyczna związana jest z częstością własną pocisku, tak więc zależy nie tylko od parametrów pocisku, ale zmienia się z prędkością i wysokością lotu. Stąd, ze względu na oscylacje wymuszone sterowaniem, bezpieczne są duże częstotliwości pracy sterów i obrotu pocisku.

Duże częstotliwości pracy sterów są natomiast niekorzystne z punktu widzenia jakości sterowania. Ograniczona częstość przenoszenia siłownika tzw. maszynki sterowej powoduje, że przy krótkich czasach wypełnienia sygnału ster nie zdąży zmienić swego położenia. Tak więc nastąpi deformacja proporcjonalności między efektem sterowania, a zadaną wartością sygnału sterującego. W skrajnym przypadku, przy częstości pracy sterów bliskiej częstości przenoszenia, nastąpi utrata sterowności.

3. Jednokanałowe - impulsowe bezpośrednie sterowanie lotem umożliwia uzyskanie wymaganej jakości sterowania przy odpowiednim doborze algorytmów odpalania silników, jak również stateczności dynamicznej pocisku. W odróżnieniu od skokowo-zmiennego pośredniego sterowania, nie zachodzi konieczność zachowania kompromisu między statecznością a sterownością stąd, stateczność pocisków z bezpośrednim sterowaniem może być dowolnie duża. Bardzo złożone przy tym sterowaniu są algorytmy odpalania silników. Przy ich wyznaczaniu należy uwzględnić taką kolejność odpalania silników, przy której niewyważenie dynamiczne pocisków będzie minimalne. Algorytmy te muszą zapewnić wymaganą jakość sterowania m.in. dzięki proporcjonalności średniego efektu sterowania do wartości sygnału sterowania.

4. Porównanie nieciągłych układów wykonawczych pośredniego działania z impulsowymi układami bezpośredniego działania

a) Okresowo i skokowo-zmienne sterowanie wytwarza siły sterujące działające w całym dowolnym zakresie sterowanego lotu, natomiast sterowanie impulsowe ma ograniczoną ilość impulsów korekcyjnych od silników. W związku z tym bardziej ograniczony czas sterowanego lotu

b) Reakcja pocisku na bezpośrednie sterowanie jest znacznie szybsza. Zmiana kierunku lotu pod działaniem sił sterujących nie wymaga pochylenia pocisku dla wytworzenia odpowiednich sił aerodynamicznych, jak to ma miejsce podczas sterowania pośredniego. Zmniejsza to inercyjność sterowania o dwa rzędy.

c) Podczas sterowania bezpośredniego występują znacznie mniejsze kąty natarcia i ślizgu, które m.in. zwiększają opór aerodynamiczny, jak również zakłócają pomiar położenia celu przez głowicę śledzącą.

d) Układy wykonawcze sterowania o działaniu impulsowym, którego podstawą są silniki rakietowe, nie posiadają żadnych ruchomych mechanizmów komplikujących konstrukcję oraz zwiększających zapotrzebowanie na energię (szczególnie elektryczną). Dodatkowo dużą zaletą tych układów jest większa niezawodność działania.

e) Zmniejszone wymagania co do aerodynamiki pocisków z impulsowym bezpośrednim sterowaniem wynikają m.in. z tego, że:

- płatowce nie wytwarzają aerodynamicznych sił nośnej i bocznej wymagających odpowiednich powierzchni nośnych oraz kątów natarcia i ślizgu;
- brak jest ograniczeń co do maksymalnych wartości stateczności dynamicznej;
- zmiana kierunku lotu odbywa się pod działaniem sił rakietowych niezależnych od prędkości lotu.

ANALYSIS OF SMALL FLYING OBJECTS CONTROL METHODS

In paper we present analysis of control methods used with small rockets and missiles. Authors presents main view on problems and methods of realizing. Paper based on authors experience from research over rockets and missiles controll

Literatura

[1] Vogt R., Głęboki R. (2004) Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem systemów sterowania lotem małokalibrowych pocisków inteligentnych. *IV Konferencja Awioniki Polańczyk 2004.*

[2] Vogt R., Głębocki R. (2004) Smart mortar missiles. *5th International Conference MECHATRONICS 2004.* Warszawa.

[3] Vogt R., Głęboki R. (2004) Ujęcie systemowe i symulacja przy projektowaniu wytwarzaniu i eksploatacji systemów sterowania. *Konferencja AUTOMATION' 2004.*

Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-00-6