

Projekt wstępny układu wykonawczego napędu sterolotek dla pocisku raketowego kalibru 72 mm

Preliminary design of the actuators of control surfaces the missile of calibre 72 mm

MARCIN CHODNICKI
MARCIN CZYŻAK
BOGDAN MACHOWSKI
JANUSZ ROSIAK
ADRIAN SZKLARSKI *

Materiały z XX SKW PWiE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.116

Przyjęto założenie, że każdy ster może być napędzany oddzielnym i niezależnym akuatorem, natomiast praca cyfrowego kontrolera pozwala realizować odpowiednim sterom funkcje sterów lub lotek (ogólnie – sterolotek). Rozwiązanie z pozoru wymagające większego skomplikowania układu elektronicznego powala wykonać jednak mechanizm sterowy, powtarzalny i realizowalny technicznie. Rozwiązanie tego typu wykorzystano w modelu pocisku kalibru 72 mm.

SŁOWA KLUCZOWE: akuator, pilot automatyczny

It is assumed that each rudder can be driven by a separate and independent actuator and the work of the digital controller can implement the appropriate functions rudders and ailerons (general – elevons). The solution apparently requires greater complexity of the electronics knocks do, however, steering mechanism, repetitive and realizable. This solution was used in the model of the missile of caliber 72 mm.

KEYWORDS: actuator, autopilot

Ogólne rozważania dotyczące sposobu rozmieszczania powierzchni nośnych i sterowych pocisku raketowego dają w efekcie dwa rodzaje układów konstrukcji płatowców pocisków, a mianowicie (rys. 1):

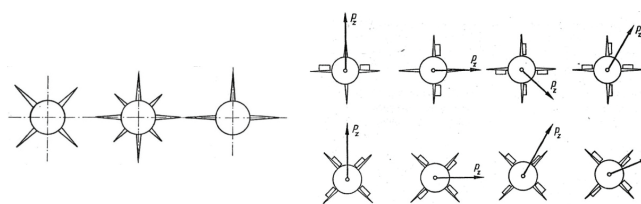
- osiowo-symetryczny;
- płasko-symetryczny.

W artykule rozważania ograniczone zostały do konstrukcji osiowo-symetrycznej. Układ osiowo-symetryczny stosowany jest do pocisków raketowych, od których wymaga się znacznej zdolności manewrowania w przestrzeni. Najważniejszą zaletą układów osiowo-symetrycznych jest możliwość sterowania przestrzennego za pomocą dwóch sygnałów zmieniających kąt wznoszenia i kąt kierunku lotu, zwanych często kątami elewacji i azymutu. Sposób takiego sterowania można najlepiej wyjaśnić na odpowiednich schematach, które przedstawiono na rys. 2. Widoczne na tych schematach krawędzie sterów, poza głównymi płaszczyznami nośnymi, reprezentują położenie krawędzi spływu steru.

Równoczesne wychylenie sterów poziomych i pionowych pociąga za sobą zwiększenie lub zmniejszenie kąta natarcia zależnie od kierunku wychylenia sterów poziomych, z równoczesnym odchyleniem pocisku w lewo lub w prawo, zależnie od kierunku wychylenia sterów pionowych. Wychylenie sterów poziomych daje w efekcie pojawienie się składowej pionowej siły nośnej, natomiast wychylenie sterów pionowych – składowej poziomej.

Wypadkowa siła nośna działać będzie w płaszczyźnie odchylonej zarówno od płaszczyzny poziomej, jak i pionowej,

* Mgr inż. Marcin Chodnicki – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych; mgr inż. Marcin Czyżak – Ministerstwo Obrony Narodowej; dr inż. Bogdan Machowski (bogdan.machowski@wat.edu.pl) – Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa; mgr inż. Janusz Rosiak (janusz.rosiak@pcosa.com.pl) – PCO S.A.; mgr inż. Adrian Szklarski (szklarskia@witu.mil.pl) – Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia



Rys. 1. Układy: a) osiowo-symetryczny; b) płasko-symetryczny [4]

Rys. 2. Możliwe kierunki siły nośnej niezależne od wychylenia sterów [4]

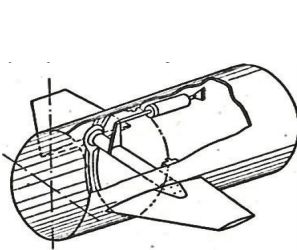
przy czym kierunek jej działania podają schematycznie rysunki z prawej strony u góry. Każda para sterów posiada dwa możliwe położenia sterowane jednym kanałem. Przy dwóch parach sterów sterowanych dwukanałowym systemem istnieje możliwość orientowania wypadkowej siły we wszystkich czterech ćwiartkach, można więc uzyskać dowolny kierunek działania siły nośnej, zapewniający przestrzenne sterowanie pociskiem raketowym. Sygnały poszczególnych kanałów są proporcjonalne do wymaganego manewru. Układ sterowania może dopuszczać ograniczony obrót pocisku dookoła osi podłużnej lub może wymagać zachowania stałego położenia powierzchni nośnych zgodnie z ich położeniem początkowym na wyrzutni.

Stery aerodynamiczne

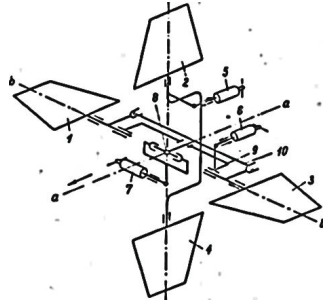
Prosty układ napędowy steru przedstawia rys. 3. Stery rozmieszczone symetrycznie po obu stronach kadłuba połączone są rurą łożyskową w dwóch punktach. Gniazda łożysk zamocowane są do kadłuba. Do rury, łączącej oba stery na sztywno, zamocowana jest dźwigenka napędzana bezpośrednio przez, w tym przypadku, siłownik. Układ taki pozwala na wychylenie obu sterów w jednakowym kierunku i o jednakowy kąt. W układach osiowo-symetrycznych co najmniej jedna para sterów posiada tak rozwiązany napęd. Jeśli obie pary sterów mają taki prosty układ napędu steru, wówczas pocisk ma jeszcze lotki wychylane różnicowo. W większości przypadków jedna para sterów spełnia rolę równocześnie sterów i lotek.

Napęd takich sterów musi zapewniać możliwość wychylenia równoczesnego sterów w jednym kierunku i różnicowo. Kinematyczny schemat różnicowego napędu sterów podany jest na rys. 4. Para sterów napędzana różnicowo 1+3, których osie obrotów oznaczono b-b, ma łożyskowanie niezależne dla każdego steru. Jednoczesne wychylenie sterów 1+3 realizuje siłownik (6) za pomocą dźwigniki i strzemienia (9). Różnicowe wychylenie sterów realizuje siłownik (7) za pomocą dźwigni (10). Niezależność obu ruchów zapewnia specjalny węzeł (8). Para sterów 2+4 wychylana jest równocześnie w jednym kierunku, ponieważ oba stery połączone są strzemieniem na sztywno. Wychylenie sterów realizuje siłownik (5). Innym rozwiązaniem jest przyjęcie założenia, że każdy ster może

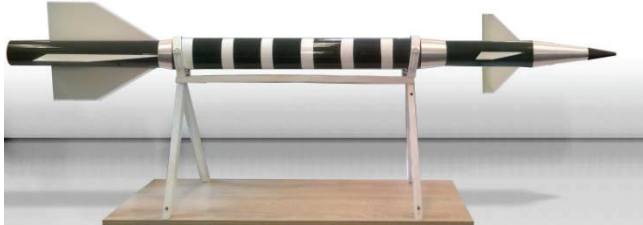
być napędzany oddzielnym i niezależnym akuatorem, natomiast praca kontrolera pozwala realizować odpowiednim sterom funkcje sterów lub lotek (ogólnie – sterolotek). Rozwiązanie z pozoru wymagające większego skomplikowania układu elektromechanicznego pozwala wykonać jednak prosty mechanizm sterowy, powtarzalny i realizowalny technicznie. Rozwiązanie tego typu wykorzystano w modelu pocisku kalibru 72 mm przedstawionego na rys. 5.



Rys. 3. Prosty układ napędu sterów [4]



Rys. 4. Kinematyczny schemat różnicowego napędu sterów [4]



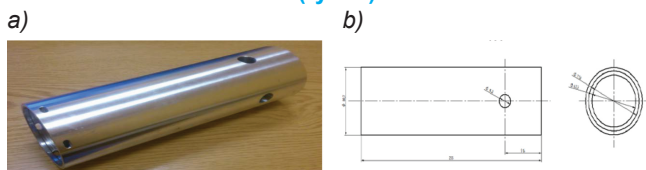
Rys. 5. Model pocisku kalibru 72 mm [1, 2]

Elementy składowe napędu sterów

Elementami składowymi napędu elektrycznego sterów będą: silnik BLDC, przekładnia, ster, stopień mocy, sterownik elektroniczny. Podstawowe wymagania:

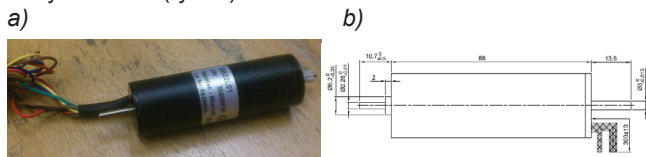
- średnica wewnętrzna kadłuba: ≤ 62 mm,
- długość przedziału sterowania: 255 mm,
- minimalny moment obrotowy: 1 Nm,
- maksymalny czas wykonania obrotu o 24° (skrajne wychylenia steru): $\leq 0,3$ s.

■ Przedział sterowania (rys. 6).



Rys. 6. Przedział sterowania: a) model, b) wymiary przedziału sterowania

■ **Silnik BLDC** – ze względu na wymagania stawiane napędowi sterów zostanie wykorzystany silnik BLDC DB22L01 firmy Nanotec (rys. 7).

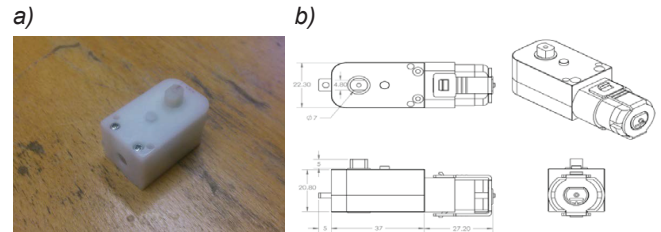


Rys. 7. Silnik BLDC, a) widok, b) rzut boczny [7]

TABLICA I. Parametry silnika BLDC [8]

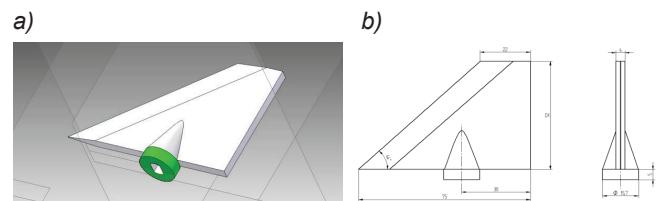
Parametr	Wartość
Napięcie zasilania	24 V
Prąd znamionowy/rozruchowy	0,62/1,5 A
Moment rozruchowy	0,022 Nm
Obroty znamionowe/ bez obciążenia	3500/6250 obr/min
Masa silnika	0,12 kg

■ **Przekładnia** – w modelu została wykorzystana plastikowa przekładnia kąтова, o przełożeniu 1:120 (rys. 8). Ze względu na demonstracyjny charakter projektu użycie plastikowej przekładni jest wystarczające, w rzeczywistym pocisku raketowym należy wykorzystać przekładnię metalową. Wykorzystany model przekładni posiada wbudowane sprzęgło zabezpieczające przekładnię przed uszkodzeniem plastikowych zębów.



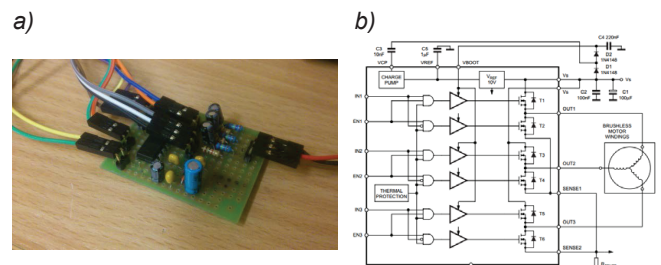
Rys. 8. Przekładnia: a) widok, b) wymiary przekładni kątovej [8]

■ **Ster aerodynamiczny** – model steru został wykonany na podstawie danych demonstratora pocisku raketowego kalibru 72 mm (rys. 9).



Rys. 9. Ster aerodynamiczny: a) model steru 3D, b) wymiary steru

■ **Stopień mocy** – w pracy został wykorzystany układ potrójnego półmostka typu H z tranzystorami typu MOSFET (rys. 10). W celu zaoszczędzenia możliwie jak najwięcej miejsca został użyty układ scalony firmy STMicroelectronics L6234 w obudowie Power DIP 20.



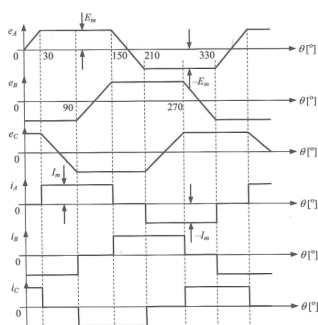
Rys. 10. Stopień mocy a) widok, b) schemat układu scalonego L6234 [9]

TABLICA II. Parametry układu L6234 [9]

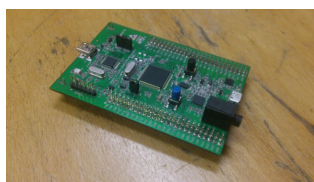
Parametr	Wartość
Napięcie zasilana	7÷52 V
Prąd wyjściowy	2,8 A

■ **Sterownik silnika BLDC** – na potrzeby projektu został wykonany sterownik trójfazowego silnika BLDC. Wykorzystano trapezową metodę sterowania. Właściwe podanie impulsów sterujących na stopień mocy wymaga określenia położenia wału, a co za tym idzie – odpowiedniej komutacji. W tym celu zastosowano pomiar siły elektromotorycznej SEM. Jest to siła wyrażona różnicą potencjałów na zaciskach źródła prądu w czasie, gdy obwód jest otwarty. W przypadku silników siła SEM powstaje w czasie oddziaływania pola magnetycznego na uzwojenia silnika podczas obrotu wirnika.

Omawiany sposób sterowania silnikiem BLDC nazywa się trapezoidalnym ze względu na kształt przebiegu siły SEM na poszczególnych fazach silnika. Na podstawie podanego wykresu można zauważyć pewien algorytm sterowania silnikiem



Rys. 11. Wzorce idealne kształtu sygnałów SEM oraz prądu [6]



Rys. 12. Widok STM Discovery F4

BLDC podzielony na sześć części. Pomiar sygnału SEM dokonuje się na fazie, która nie jest aktualnie zasilana. Następnie porównuje się mierzony sygnał z jedną z sum sygnałów trzech faz. W momencie przecięcia się następuje przełączenie na kolejną komutację.

W projekcie wykorzystano układ firmy STMicroelectronics STM32F4. Układ ten bazuje na procesorze ARM Cortex M4 o częstotliwości pracy 168 MHz i 1 MB pamięci Flash.

Opis działania napędu sterów

Napęd steru pod względem konstrukcji najczęściej stanowi jeden zespół, który jest umieszczony w oddzielnym przedziale kadłuba pocisku plot. Można spotkać rozwiązania, w których źródła energii są oddzielnymi zespołami. Z zasady źródło energii, które zasila napęd steru, jest głównym źródłem energii zasilającym pokładowe urządzenia pocisku.

Na podstawie analizy parametrów silnika BLDC został dobrany odpowiedni układ półmostka typu H, zbudowany z dwóch tranzystorów MOSFET na każdą fazę silnika. Dodatkowo jedno z wymagań stawianych całemu układowi to możliwie małe rozmiary. Dlatego został użyty układ scalony firmy STM L6234. Przedstawione w poprzednim rozdziale parametry stopnia mocy są wystarczające do zasilania silnika BLDC. Szczególną uwagę należy zwrócić na napięcie zasilania (24V – wymagane napięcie zasilania silnika oraz 52V – maksymalne napięcie, jakie może obsłużyć stopień mocy), pobierany prąd (silnik pobiera maksymalnie 1,5A, według noty katalogowej układ scalony wytrzyma do 2,8A, zatem uzyskano około 180% margines bezpieczeństwa dla temperatury 25°C).

Ponieważ prędkość obrotowa silnika będzie sterowana sygnałem PWM, kolejnym ważnym elementem jest pojemność bramki tranzystora. Od tego parametru zależy: szerokość zakresu sterowania prędkością silnika oraz skomplikowanie sterownika. Według noty aplikacyjnej L6234 można sterować wewnętrznymi tranzystorami z częstotliwością do 50 kHz.

Kolejnym etapem jest eliminacja zakłóceń. Poza fabrycznymi elementami stabilizacji napięcia zasilania znajdującymi się na płytce STM, zastosowano kondensatory 100µF i 0,1µF podpięte pomiędzy zasilaniem stopnia mocy V_s , a uziemieniem GND. W celu odfiltrowania zasilania sterującego głównym tranzystorem MOSFET dodatkowo zastosowano kondensator 220nF. Napięcie odniesienia V_{ref} zostało sprzężone poprzez kondensator 1µF.

Sterowanie silnikiem będzie wykorzystywać pomiar siły elektromotorycznej SEM, w tym celu należy zastosować odpowiedni układ dzielnika napięcia oraz filtracji sygnału. Zostanie wykorzystany filtr dolnoprzepustowy. Pozwala to na właściwe odfiltrowanie zakłóceń układu oraz sygnału PWM.

Trzecim etapem jest dobór właściwego układu mikroprocesorowego do sterownika silnika od którego oczekuje się spełnienia następujących parametrów:

- napięcie zasilające silnik: 24 V,
- maksymalny prąd silnika: 1,5 A,
- elementy wykonawcze i mikrokontroler na wspólnej masie,
- napięcie sygnałów sterujących z mikrokontrolera: 3,3 V,
- maksymalny prąd sygnałów sterujących: 20 mA,
- sterownik musi posiadać możliwość przenoszenia sygnałów PWM do 50 kHz.

Według noty aplikacyjnej układu L6234 wszystkie tranzystory można sterować przy napięciu zasilania dla stanu wysokiego 2÷7 V. Zatem wykorzystany układ mikroprocesorowy spełnia wymagania. Przy zasilaniu 3,3 V tranzystory pozwalają na uzyskanie prądu drenu ponad 1,5 A, umożliwiając sterowanie kluczami tranzystorowymi, co jest wystarczające dla wybranego silnika BLDC.

Podsumowując tak dobrane elementy układu sterowania silnikiem BLDC pozwalają na jego bezpieczną i ciągłą pracę. Oscylogram komutacji silnika BLDC oraz momentu przełączenia na kolejną komutację na podstawie sygnału SEM i sumy sygnałów przedstawia rys. 13.



Rys. 13. Oscylogram komutacji silnika BLDC oraz momentu przełączenia na kolejną komutację na podstawie sygnału SEM i sumy sygnałów

Podsumowanie

Napędy z wykorzystaniem silnika BLDC jako elementu wykonawczego znajdują zastosowanie tam, gdzie wymagany jest duży moment obrotowy ($M = 2,64 \text{ Nm}$, z wykorzystaniem przekładni), małe wymiary (łączna długość silnika i przekładni: 105 mm, szerokość i wysokość: ok. 22 mm) oraz niezawodność (brak wrażliwych elementów, np. szczotek komutatora). Właściwości dynamiczne silnika są bardzo dobre w porównaniu do silników krokowych czy silników prądu stałego. Należy jednak pamiętać, że silnik BLDC wymaga bardziej skomplikowanego układu elektronicznego sterownika, tym bardziej przy wykorzystaniu bezczujnikowej metody pomiaru kąta położenia wału.

LITERATURA

1. Baldursson S. „BLDC Motor Modeling and Control – a Matlab/Simulink Implementation”, Sverige, 2005.
2. Czyżak M. „Demonstrator napędu sterów przeciwlotniczego pocisku raketowego”, Praca dyplomowa, WAT, Warszawa 2014.
3. Chodnicki M. „Demonstrator pilota automatycznego przeciwlotniczego pocisku raketowego”, Praca dyplomowa, WAT, Warszawa 2014.
4. Dubiel S., Frątczak W. „Konstrukcja pocisków raketowych: Cz. 3, Konstrukcja podzespołów i wybrane zagadnienia z podstaw projektowania”, Warszawa, WAT 1972.
5. Koruba Z., Osiecki J.W. „Budowa, dynamika i nawigacja wybranych broni precyzyjnego rażenia”, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2006.
6. Zawirski K., Deskur J. „Automatyka napędu elektrycznego”, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2012.
7. Karta katalogowa firmy Nanotec silnika BLDC DB22L01.
8. Karta katalogowa firmy Pololu przekładni Pololu1121.
9. Karta katalogowa firmy STMicroelectronics układu L6234.