

Synteza pilota automatycznego demonstratora rakiety przeciwlotniczej

Synthesis of automatic pilot demonstrator anti-aircraft missiles

BOGDAN MACHOWSKI
MIROSLAW MAKOWSKI
DOROTA MILLER
BOGDAN ZYGMUNT *

Materiały z XX SKWPIE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.157

Autopilot demonstratora pocisku raketowego na podstawie sygnałów z układu pomiarowego powinien stabilizować charakterystyki dynamiczne pocisku. Układ nawigacji bezwładnościowej pozwala określać położenie pocisku w przestrzeni względem wcześniej ustalonego układu współrzędnych. Ze względu na fakt, iż pocisk raketowy docelowo będzie zdalnie sterowany, jako układ odniesienia przyjęto układ związany z ziemią. Sygnały z układu pełniące funkcję układu nawigacji bezwładnościowej są sygnałami sterującymi dla układu pilota automatycznego. Uzupełnieniem sygnału zadajnika jest wprowadzony dodatkowo sygnał kompensacji zmiany masy.

SŁOWA KLUCZOWE: pocisk raketowy, pilot automatyczny

The demonstrator anti-aircraft missile autopilot based on signals from the measuring system should stabilize the dynamic characteristics of the missile. Inertial navigation system allows you to specify the location of the missile in space relative to the pre-established coordinate. Due to the fact that the missile eventually will be remote-controlled, adopted as a reference system associated with the layout. The signals from the inertial navigation system function to act as control signals for the remote control. Complement of the signal adjuster is introduced in addition compensation signal changes.

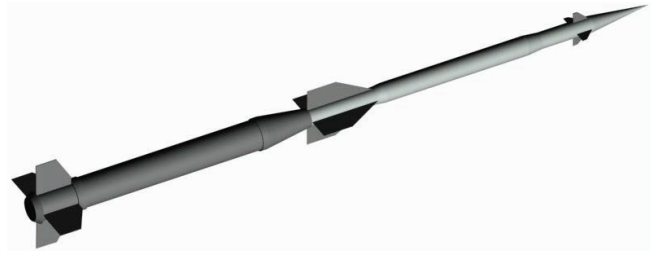
KEYWORDS: missile, autopilot

Demonstrator pocisku raketowego Błyskawica (rys. 1) jest pociskiem o małym kalibrze. Układ pilota automatycznego (PA) musi się zmieścić w średnicy wewnętrznej II stopnia pocisku, która wynosi poniżej 70 mm. Ponadto elementy elektroniczne powinny być umieszczone w taki sposób, aby siła wynikająca z siły ciągu silnika raketowego dociskała je do płytki PCB. W PA demonstratora zastosowany został cyfrowy zestaw uruchomieniowy, będący odpowiednikiem stm32f4discovery.

Autopilot demonstratora pocisku raketowego na podstawie sygnałów z układu pomiarowego powinien stabilizować charakterystyki pocisku raketowego. Układ nawigacji bezwładnościowej pozwala określać położenie pocisku w przestrzeni względem wcześniej ustalonego układu współrzędnych. Ze względu na fakt, iż jest pocisk raketowy docelowo będzie sterowany komendowo, przyjęto układ związany z ziemią. Sygnały z układu pełniące funkcję układu nawigacji bezwładnościowej są sygnałami sterującymi dla układu pilota automatycznego. Uzupełnieniem sygnału zadajnika jest wprowadzony dodatkowo sygnał kompensacji zmiany masy.

Algorytm pracy pilota automatycznego został zamodelowany w programie Matlab/Simulink, a następnie z wykorzystaniem Real-Time Workshop, Real-Time Workshop Embedded Coder, Wajung wygenerowany został kod w języku C pod mikroprocesor STM. W dalszej artykule przedstawiono w sposób graficzny algorytm pracy autopilota.

* Dr inż. Bogdan Machowski (bogdan.machowski@wat.edu.pl); mgr inż. Mirosław Makowski (miroslaw.makowski@wat.edu.pl); mgr inż. Dorota Miller (dorota.miller@wat.edu.pl); prof. dr hab. inż. Bogdan Zygmunt (bogdan.zygmunt@wat.edu.pl) – Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa



Rys. 1. Szkic demonstratora naddźwiękowego dwustopniowego pocisku raketowego [5]

Koncepcja pilota automatycznego

Stosunkowo nową i ciągle rozwijającą się gałęzią projektowania oprogramowania są narzędzia do automatycznej generacji kodu w języku C. Zbudowane w ten sposób programy mogą być wykorzystywane zarówno w systemach posiadających systemy operacyjne, jak i nieposiadających takowego systemu.

Automatyczna generacja kodu, jego kompilacja i programowanie pamięci FLASH mikrokontrolera znacznie przyspieszają proces wdrażania produktu. Weryfikacja otrzymanych wyników metodą automatycznej generacji kodu może być przeprowadzona metodą umieszczenia zaprogramowanego sterownika w pętli sprzężenia (HIL – ang. *Hardware In the Loop*), stymulowania jego działania z komputera, na którym zainstalowany jest Matlab, i monitorowaniu jego odpowiedzi. Symulacja takiego układu wraz z zaprogramowanym urządzeniem pozwala na szybką weryfikację poprawności algorytmu oraz kodu programu. W wielu przypadkach symulacje takie są wręcz wymagane przed etapem wdrażania produktu. Środowiskiem oferującym przedstawione rozwiązania jest Matlab firmy MathWorks. W dalszej części pracy przedstawione zostanie środowisko Matlab w zastosowaniu do programowania układów z rodziny ARM Cortex M4. Firma MathWorks zaprojektowała graficzne środowisko programowania pod nazwą Simulink, będące nieodłączną częścią oprogramowania Matlab. Jak twierdzi polski przedstawiciel firmy MathWorks: Simulink jest graficznym środowiskiem symulacji i projektowania z wykorzystaniem modeli układów dynamicznych. Hierarchiczne schematy blokowe Simulink tworzone są z gotowych lub przygotowanych przez użytkownika bloków, a także z bloków zawartych w bibliotekach (Blocksets). Biblioteki te zorientowano na konkretne dziedziny zastosowań lub na określone dziedziny modelowania fizycznego. Jedną z największych zalet programu Simulink jest możliwość generacji samodzielnego kodu w języku C. Kod ten może być użyty w programach, w tym również aplikacjach czasu rzeczywistego. Aplikacje przygotowane tą drogą mogą współpracować z jedno- oraz wielozadaniowymi systemami operacyjnymi, a także układami procesorowymi bez systemu operacyjnego. Za generację kodu C dla urządzeń wbudowanych w systemie

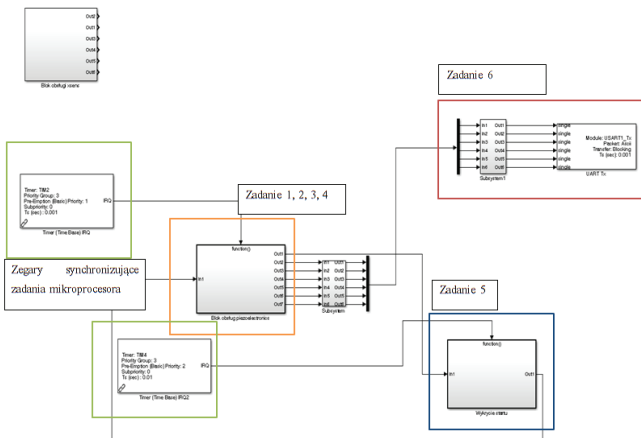
Matlab odpowiada narzędzie Embedded Coder. Kolejną zaletą przedstawianego środowiska jest udostępnianie przez różnych producentów swoich własnych toolbox-ów do obsługi dedykowanego sprzętu. Do takich narzędzi należą RapidSTM32 oraz Waijung firmy Aimagin z możliwością programowania mikroprocesorów ST mikroelektroniki wraz z dołączonymi układami peryferyjnymi.

Program autopilota został zrealizowany w środowisku Matlab Simulink firmy MathWorks. Program zawiera elementy synchroniczne sterowane przerwaniem zegarów mikroprocesora oraz obsługę asynchronicznych zdarzeń wywoływanych przez zewnętrzne sygnały. Program wykonuje następujące, podstawowe zadania:

- Odczyt danych z sensorów: akcelerometrów oraz żyroskopów.
- Przetwarzanie oraz filtrację danych z czujników.
- Wylisanie sygnałów sterujących na podstawie przyjętego prawa sterowania.
- Sterowanie wyjściami analogowymi mikroprocesora.
- Obsługę zdarzeń zewnętrznych (start pocisku raketowego, kontrolę kąta przechylenia).
- Utworzenie interfejsu komunikacyjnego z komputerem w celu weryfikacji sygnałów oraz przeprowadzenia symulacji ze sprzętem w pętli sprzężenia (HIL).

Synteza pilota automatycznego

Na rys. 2 przedstawiono główny schemat w programie Simulink autopilota z wyszczególnionymi blokami odpowiedzialnymi za opisane powyżej zadania.

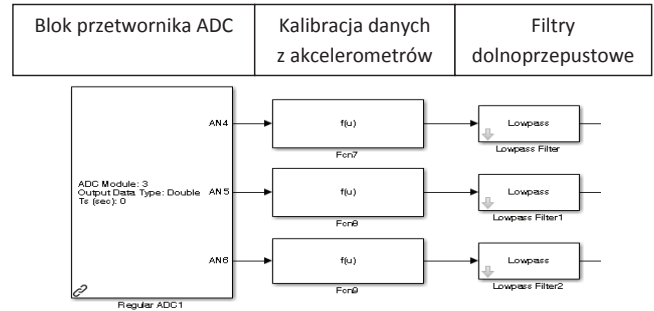


Rys. 2. Główny schemat w programie Simulink działania autopilota

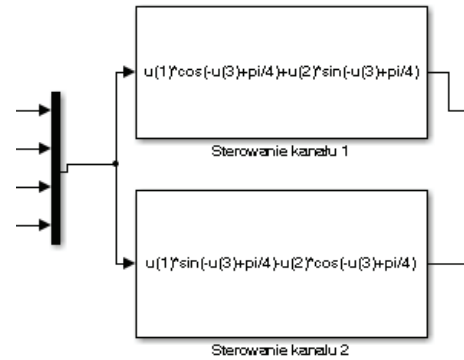
Zastosowany jednorodzeniowy mikroprocesor nie posiada wbudowanej jednoczesnej obsługi wielu zadań – problem ten rozwiązano przez synchronizację zegarów o różnej częstotliwości, wywołujących przerwania. W obsłudze przerwania umieszczono bloki funkcjonalne kodu odpowiedzialne za realizację poszczególnych zadań (*multirate single tasking*). Przerwania te wykorzystywane są również do kontroli czasu lotu pocisku. Po określonym czasie lotu wystawiany jest odpowiedni sygnał, który może być wykorzystywany do przeprowadzenia odpowiedniego manewru rakiety lub, jej likwidacji.

Na rys. 3 przedstawiono elementy bloku odpowiedzialnego za odbiór danych z akcelerometrów oraz ich przetwarzanie. Do pomiarów danych z akcelerometrów wykorzystano 12-bitowy przetwornik A/C wyzwalany przerwaniem z częstotliwością 1 kHz, podłączony do pinów mikroprocesora: F6, F7, F8. Na podstawie danych uzyskanych z akcelerometrów oraz wyliczonych kątów obliczane są sygnały sterujące dla kanałów 1 i 2 PA (rys. 4).

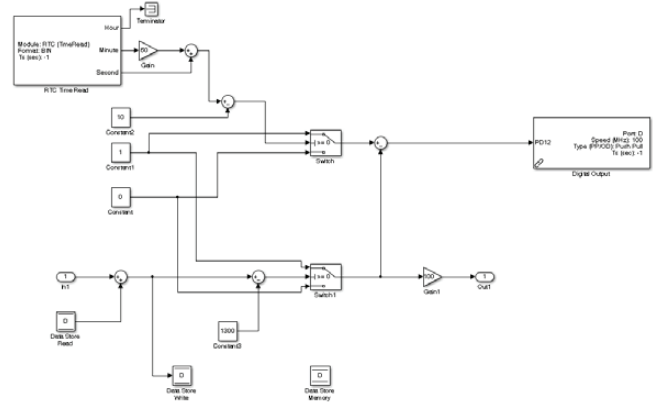
Kolejną funkcjonalnością programu jest odliczanie czasu od momentu włączenia układu oraz czasu po wykryciu startu



Rys. 3. Układ przetwarzania danych z czujników pomiarowych



Rys. 4. Bloki wyliszające sygnały sterowania kanałów 1 oraz 2



Rys. 5. Schemat obliczania czasu po starcie pocisku i po włączeniu układu

pocisku raketowego. Schemat tego modułu przedstawiono na rys. 5.

Badania semifizyczne zespołu sterów z pilotem automatycznym

Badanie dynamiki systemów sterowania obiektów latających stanowi zagadnienie bardzo złożone ze względu na fakt, iż obiekt badań z reguły jest obiektem o dużych wymiarach i charakteryzuje się sześcioma stopniami swobody. Dla zapewnienia właściwej dynamiki systemu sterowania istnieje konieczność opracowania programów komputerowych i stanowisk pomiarowych do weryfikacji badań symulacyjnych w zakresie występujących w czasie lotu zjawisk, które mają niekorzystny wpływ na ostateczne wyniki pomiaru.

Do tych zjawisk, mających decydujący wpływ na działanie systemu sterowania, można zaliczyć przede wszystkim:

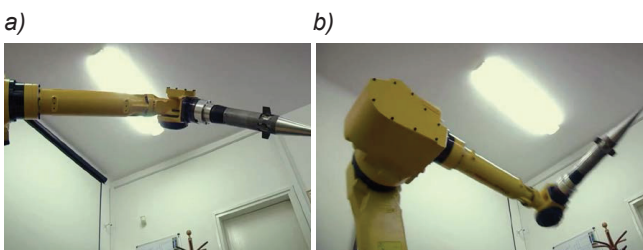
- drgania własne pocisku oraz drgania spowodowane procesem sterowania,
- przemieszanie się środka masy pocisku względem środka bazy pomiarowej,
- niespełnienie we współczesnych pociskach założenia o dużej smukłości i założenia upraszczającego uznania pocisku za bryłę sztywną,
- szумы pomiarowe.

W związku z tym badania stanowiskowe, mające na celu weryfikację badań symulacyjnych realizowanych w takich środowiskach, jak Matlab, wymagają zastosowania manipulatorów o minimum trzech stopniach swobody, pozwalających na zadawanie wymuszeń o charakterze zbliżonym do rzeczywistych wymuszeń działających na obiekt podczas jego eksploatacji. Obecnie istnieją na rynku firmy specjalizujące się w tego typu konstrukcjach, pozwalających na badanie obiektów latających z uwzględnieniem nawet do pięciu stopni swobody. Rozwiązania takie są jednak bardzo drogie oraz nie pozwalają na uzyskiwanie przemieszczeń – zwłaszcza liniowych, oddających w pełni parametry ruchu obiektu. Nowym rozwiązaniem jest zastosowanie jako manipulatora robota przemysłowego, pozwalającego na zadawanie przemieszczeń liniowych w układzie związanym z obiektem, jak również zmianę orientacji obiektu. Rozwiązanie takie stwarza możliwość uzyskania przemieszczeń liniowych rzędu nawet jednego metra, a nawet więcej, a także prędkości w granicach do $360^\circ/s$ dla pojedynczej osi.

Produkowane obecnie roboty charakteryzują się powtarzalnością rzędu nawet 0,001 mm przy zachowaniu prędkości dla pojedynczej osi dochodzących do $720^\circ/s$ dla ostatniej osi, a dla pozostałych – między 360 a $450^\circ/s$. Z założenia dla stanowisk zrobotyzowanych ich działanie realizowane jest w trybie automatycznym, co ma zapewnić uzyskanie jak największej wydajności procesu technologicznego. Zastosowanie robota przemysłowego jako manipulatora operującego obiektem badanym pozwala na badania uwzględniające zarówno przemieszczenia liniowe w układzie współrzędnych związanym z obiektem, jak i zmianę orientacji obiektu, a nawet uwzględnienie zmiany położenia środka masy.

W ramach realizowanego projektu opracowania stanowiska do badania dynamiki układów sterowania pocisków raketowych przyjęto, że stanowisko to powinno zapewnić funkcje stołu obrotowego z możliwością manipulacji obiektem o sześciu stopniach swobody i masie do 50 kg, przy zachowaniu niezbędnych wymagań co do prędkości i dokładności pozycjonowania elementu manipulowanego. Po przeanalizowaniu dostępnych na rynku robotów przemysłowych sześciuosiowych zdecydowano się więc na wykorzystanie w stanowisku robota FANUC M-710iC/50 (rys. 6).

Aby odwzorować zmiany parametrów lotu pocisku, konieczne jest opracowanie programu uwzględniającego zmianę w czasie wszystkich sześciu parametrów. Dodatkowym utrudnieniem jest konieczność wprowadzenia dużej ilości danych reprezentujących poszczególne punkty na trajektorii, co wyklucza bezpośrednią możliwość zaprogramowania robota przy użyciu standardowego Teach pendanta. W związku z tym konieczne jest wykorzystanie języka programowania KAREL opracowanego dla robotów firmy FANUC, który to język pozwala na wykorzystanie zaawansowanych funkcji operujących na danych charakteryzujących trajektorię ruchu pocisku. Dane te uzyskane albo na drodze symulacji, albo eksperymentalnie w wyniku pomiarów zrealizowanych na platformie badawczej, na rzeczywistym demonstratorze w locie muszą zostać

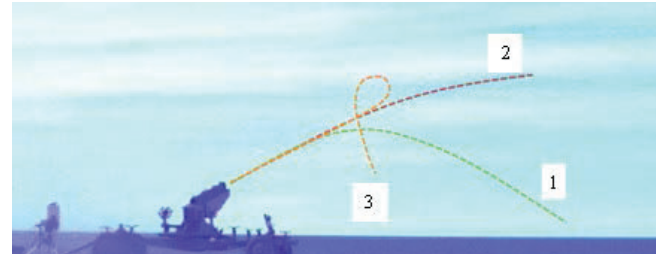


Rys. 6. Badania semifizyczne zespołu sterów z PA w laboratorium Konstrukcji Rakietowych WAT (wybrane klatki z filmu [6]), odpowiednio: a) zespół sterów zakupiony w ramach projektu na robotycznym stanowisku badań semifizycznych wykonanym w WAT; b) szybkie przemieszczenie elementu demonstratora

wprowadzone w postaci cyfrowej do kontrolera robota, gdzie następnie specjalny program zamieni je na parametry ruchu robota.

Podsumowanie

Do oceny jakości sterowania demonstratora pocisku raketowego Błyskawica w WAT przygotowano trzy zespoły: stery – pilot automatyczny. Przeprowadzono badania poligonowe (27 czerwca 2014 r.). Kwintesencję przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Trajektorie rakiet z blokami sterów (1, 3) testowanych na poligonie 27.06.2014 r.

Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

1. Działanie pilota automatycznego w pełni spełniło wymogi bezpieczeństwa. Nagrane filmy z lotów 1 i 3 wskazują na działanie systemu zgodnie z przewidywanym zachowaniem.
2. Podczas lotu aparatura zawierająca mikrokontroler działała niezawodnie w warunkach znacznych przyspieszeń – brak rejestracji wyników z telemetrii (nieprawidłowe działanie zespołu) zmniejsza możliwość wnioskowania. W przyszłości należy wykorzystywać telemetrię o niezawodności nie mniejszej niż niezawodność aparatury pokładowej.
3. Na podstawie wykorzystanej aparatury pomiarowej można stwierdzić, że minimalna prędkość kiedy efektywność sterów aerodynamicznych jest wystarczająca do realizacji prawa sterowania, wynosi ok. 110 m/s oraz że obrót układu współrzędnych związanych z rakieta względem układu ziemskiego o kąt większy niż 45° nastąpił w czasie krótszym niż 0,3 s.
4. Strzał 1 wykazał, że zdolność manewrowa pocisku jest wysoka, a strzał 3 wykazał zdolność zespołu sterów wraz PA do stabilizacji toru. Ponadto strzał 3 wykazał możliwość stabilizowanego lotu programowego w zrealizowanej konfiguracji; brak danych z telemetrii nie pozwala jednoznacznie określić przyczyny działania programu sterowania na innej niż założona trajektoria.

* * *

Praca była finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu nr R 00 002 09.

LITERATURA

1. Koruba Z., Osiecki J.W. „Budowa, dynamika i nawigacja wybranych broni precyzyjnego rażenia”. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2006.
2. Machowski B., Motyl K. „Analiza możliwości opracowania przelicznika dla systemu artyleryjskiego na podstawie równań ruchu pocisku”. Biuletyn WAT, Warszawa 1998.
3. Machowski B., Panasiuk K. „Uniwersalne stanowisko do badania dynamiki systemów sterowania pocisków raketowych”. *Mechanik* nr 7/2011, s. 545÷550.
4. Machowski B., Sawicki G. „Elementy normalizacji w zapewnieniu niezawodności sterowanego pocisku raketowego precyzyjnego rażenia”. *Mechanik* nr 7/2011, s. 1039÷1048.
5. Zygmunt B., Panasiuk J., Machowski B., Kaczmarek W. „Symulacja dynamiki pocisku raketowego w warunkach laboratoryjnych”. *Mechanik* nr 7/2014, s. 745÷752.
6. Film programu Nasza Armia, odc. 114 z dnia 17.06.2014, TVP 2014. ■