

SYMULACYJNE TECHNIKI WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA SYSTEMU AWIONICZNEGO BEZZAŁOGOWEGO STATKU POWIETRZNEGO

Streszczenie

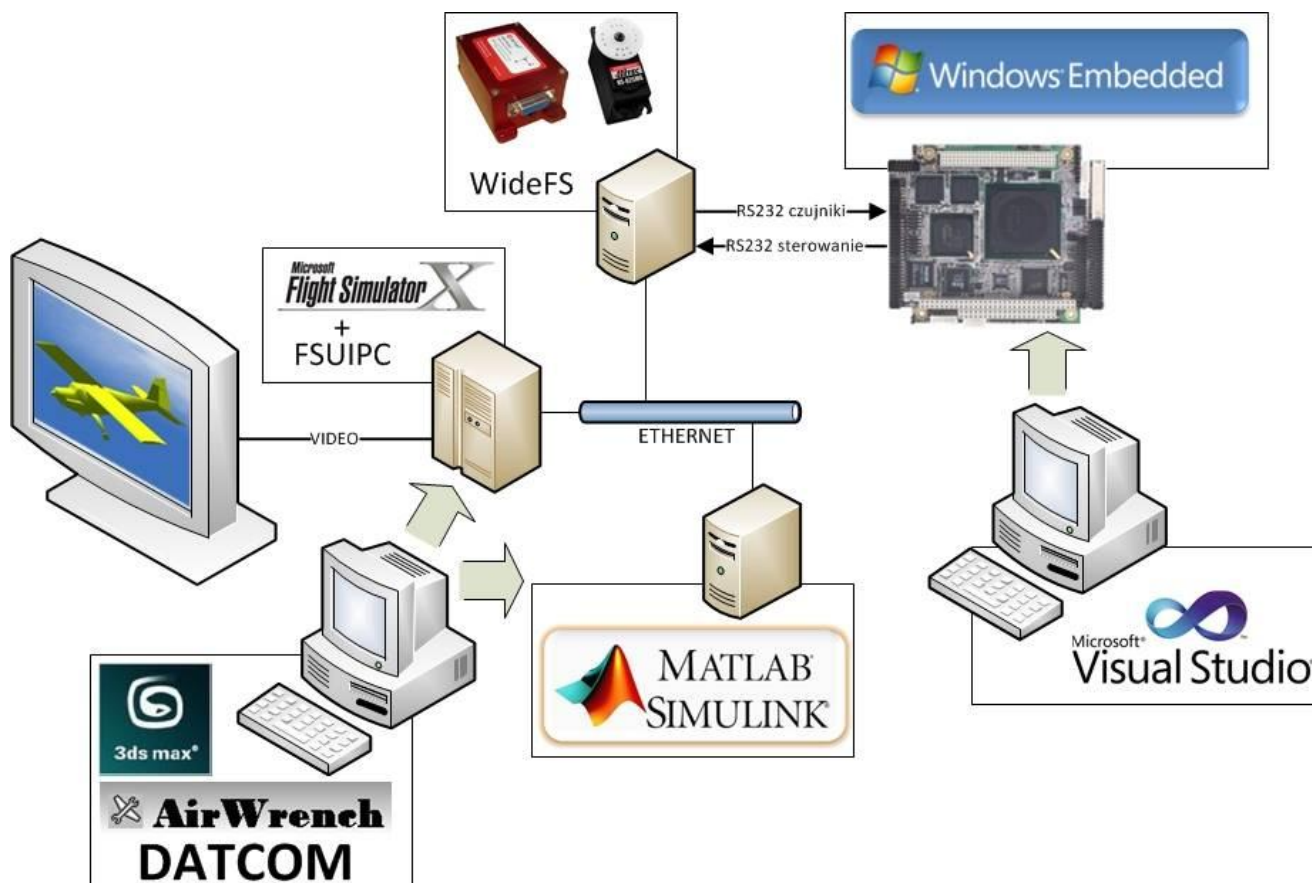
Projektowanie systemu awionicznego bezzałogowego statku powietrznego jest procesem złożonym, dlatego doświadczenia projektanta powinny wspierać zaawansowane narzędzia do wspomagania projektowania i szybkiego prototypowania. W pracy przedstawiono narzędzia wspierające projektanta na etapach budowy modelu dynamiki statku powietrznego, projektowania algorytmów sterowania i nawigacji oraz budowy i testowania oprogramowania i otaczającego go systemu operacyjnego. Przybliżono metody pracy z narzędziami pozwalającymi na oszacowanie charakterystyk aerodynamicznych statku powietrznego na podstawie jego parametrów geometrycznych, narzędzia do wspomagania projektowania algorytmów i automatycznej generacji kodu oraz środowiska do śledzenia, analizy i wyszukiwania błędów w aplikacjach działających pod kontrolą wbudowanych systemów operacyjnych.

WSTĘP

Projektowanie systemu awionicznego bezzałogowego statku powietrznego jest procesem złożonym i wymagającym, obok doświadczenia projektanta, zaawansowanych narzędzi symulacyjnych. W Zakładzie Awioniki i Uzbrojenia Lotniczego opracowano stanowisko badawcze (Rys. 1), umożliwiające testowanie komputera pokładowego systemu awionicznego w układzie HIL (ang. Hardware In the Loop Simulation) [1]. Takie rozwiązanie jest już dość często stosowane podczas projektowania systemów pokładowych [2, 3, 4], ponieważ moc obliczeniowa współczesnych komputerów i dostępne

narzędzia symulacyjne pozwalają prowadzić testy w czasie zbliżonym do rzeczywistego. W procesie projektowania systemu awionicznego można wykonywane czynności przypisać kolejnym etapom, których powtarzalność ułatwia wprowadzenie korekty po przeprowadzonych badaniach. Opracowane stanowisko daje możliwość bieżącej weryfikacji i udoskonalania elementów systemu, powstających przy silnym wsparciu narzędzi symulacyjnych, na każdym z kolejnych etapów projektowania.

Dostępność rozbudowanych i zaawansowanych narzędzi symulacyjnych, które można wykorzystać w procesie projektowania, pozwoliła w znacznym stopniu przyspieszyć i ułatwić pracę



Rys. 1. Stanowisko badawcze do testowania systemu w układzie HIL

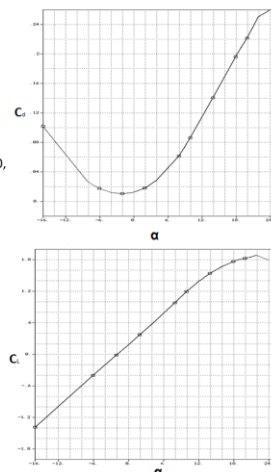
projektanta. Poniżej przedstawiono narzędzia wykorzystane do wspomagania projektowania systemu awionicznego na kolejnych etapach projektu. Kluczowym etapem w tym procesie pozostały jednak testy i weryfikacja przyjętych rozwiązań [5].

1. OSZACOWANIE DYNAMIKI STATKU POWIETRZNEGO

Przed rozpoczęciem procesu projektowania systemu awionicznego, który z założenia ma charakter cykliczny, konieczne jest opracowanie modelu dynamiki obiektu. Wyznaczenie modelu matematycznego statku powietrznego, wymaga znajomości jego dynamiki i określenia jej w postaci równań. W automatyce stosuje się opis obiektu w postaci transmitancji operatorowej w przestrzeni operatorowej lub w postaci równań stanu i wyjścia w przestrzeni czasu. Obydwa sposoby opisu zapewnią możliwość analizy dynamiki obiektu. Opis dynamiki obiektu można uzyskać na podstawie analitycznych obliczeń i przekształceń, składając go z opisów poszczególnych elementów statku powietrznego, odpowiednio powiązanych i oddziałujących na siebie określonymi sygnałami. Warunkiem powodzenia tego etapu jest bardzo dokładna znajomość budowy statku powietrznego i zależności występujących pomiędzy jego podzespołami. Ponadto metoda ta wymaga znacznego doświadczenia pozwalającego ocenić i zinterpretować nie tylko opis poszczególnych elementów z osobna, ale również efekt ich integracji i umieszczenia w zmiennym środowisku przestrzeni powietrznej. Alternatywą jest identyfikacja obiektu jako całości [6]. Proces ten przeprowadza się na podstawie interpretacji sygnałów wyjściowych i wywołujących je sygnałów wejściowych oraz zakłóceń. Identyfikacja obiektów jest zagadnieniem złożonym, dlatego dużym ułatwieniem jest wykorzystanie narzędzi pakietu MATLAB. W przypadku

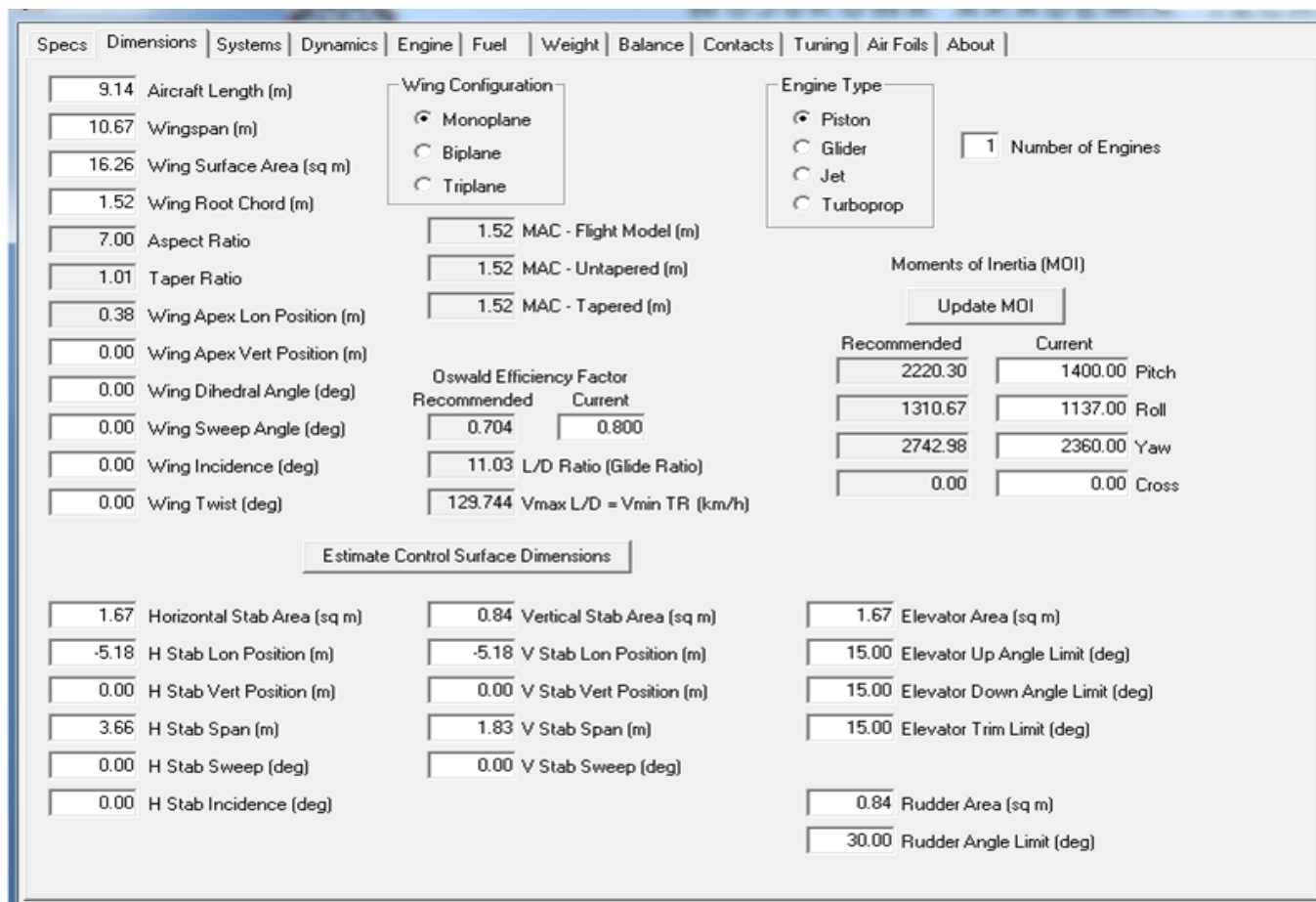
identyfikacji dynamiki statku powietrznego można zebrać potrzebne dane w czasie rzeczywistego lotu, podczas którego pilot wykonuje zadane manewry przy jednoczesnej rejestracji położenia powierzchni sterujących jako sygnału sterującego, warunków atmosferycznych jako sygnału zakłócającego oraz położenia, prędkości i przyspieszeń samolotu jako sygnału wyjściowego. Można również zebrać odpowiedni zestaw danych prowadząc badania statku powietrznego w tunelu aerodynamicznym.

```
*****
* Flight Conditions *
*****
$FLTCN LOOP=2.0,
NMACH=1.0, MACH(1)=0.4,
NALT=1.0, ALT(1)=0.0,
NALPHA=20.0,
ALSCHD(1)=-16.0,-8.0,-6.0,-4.0,-2.0,0.0,2.0,4.0,8.0,
9.0,10.0,12.0,14.0,16.0,18.0,19.0,20.0,21.0,22.0,24.0,
STMACH=0.6, TSMACH=1.4, TR=1.05
SBODY NX=16.0,
X(1)= 0.0, 3.0, 6.0, 9.0, 12.0, 15.0, 18.0, 21.0,
24.0, 27.0, 30.0, 33.0, 36.0, 42.0, 185.0, 238.0,
R(1)= 0.0, 3.8, 5.6, 6.9, 7.9, 9.0, 9.45, 10.0,
10.4, 10.7, 11.0, 11.1, 11.5, 11.7, 11.7, 0.0,
ZU(1)=0.0, 3.0, 4.5, 5.5, 6.3, 7.2, 7.6, 8.0,
8.3, 8.6, 8.8, 8.9, 9.2, 9.4, 20.0, 0.0,
ZL(1)=0.0, 1.4, 2.0, 2.5, 2.8, 3.2, 3.4, 3.6,
3.7, 3.8, 4.0, 4.0, 4.12, 4.2, 4.0, 0.0,
BNOSE=1.0, BTAIL=2.0,
BLN=30.0, BLA=50.0,
ITYPE=3.0, METHOD=1.05
```



Rys. 2. Plik wejściowy programu Datcom i wizualizacja oszacowanych charakterystyk aerodynamicznych

Jeszcze innym sposobem uzyskania opisu obiektu jest wykorzystanie specjalizowanego oprogramowania, które na podstawie parametrów geometrycznych oblicza przybliżone charakterystyki



Rys. 3. Interfejs użytkownika programu AirWrench do wprowadzania danych wejściowych

aerodynamiczne. Przykładem takiego oprogramowania jest opracowany na potrzeby US AirForce – Datcom (Rys. 2).

Kolejnym rozwinięciem tego podejścia jest oprogramowanie AirWrench (Rys. 3), oparte na sprawdzonych algorytmach Datcom, pozwalające wprowadzić parametry w przyjaznym, graficznym interfejsie i przygotować plik konfiguracyjny modelu statku powietrznego wykorzystywany bezpośrednio w środowisku symulacyjnym [7].

W celu dostarczenia w pełni wiarygodnego modelu dynamiki konieczne jest przeprowadzenie identyfikacji obiektu, co jest zadaniem skomplikowanym i czasochłonnym. Dlatego na tym etapie można zastosować przybliżenie modelu dynamiki przy użyciu narzędzi do szybkiego prototypowania Datcom i AirWrench. Oprogramowanie Datcom na podstawie parametrów geometrycznych statku powietrznego dostarcza przybliżonych charakterystyk aerodynamicznych.

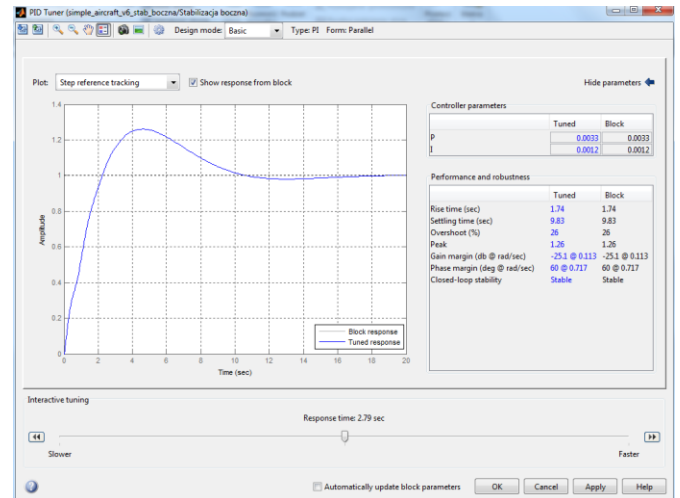
Macierze charakterystyk w postaci pliku wynikowego Datcom importowano do środowiska Matlab gdzie zbudowano przybliżony model dynamiki badanego obiektu (Rys. 4). Jednocześnie charakterystyki z Datcom oraz ponownie parametry geometryczne zostały użyte w oprogramowaniu AirWrench do budowy modelu dynamiki w środowisku modułu symulacyjnego. Tak więc charakterystyki aerodynamiczne statku powietrznego generowane w Datcom posłużyły w środowisku MATLAB z użyciem Simulink Aerospace Blockset do uzyskania modelu gotowego do projektowania algorytmów sterowania w oparciu o przeprowadzone badania [8] oraz do budowy modelu działającego w środowisku wizualnej symulacji.

2. WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA ALGORYTMÓW I AUTOMATYCZNA GENERACJA KODU

Algorytmy stabilizacji, sterowania i nawigacji przedstawiono przy pomocy schematów blokowych w pakiecie oprogramowania MATLAB/Simulink. Za pomocą tego narzędzia można zarówno dobierać odpowiednie elementy systemu jak np. regulatory PID (Rys. 5) w układzie sterowania i stabilizacji jak i testować system jako całość z możliwością ciągłej obserwacji przepływu danych.

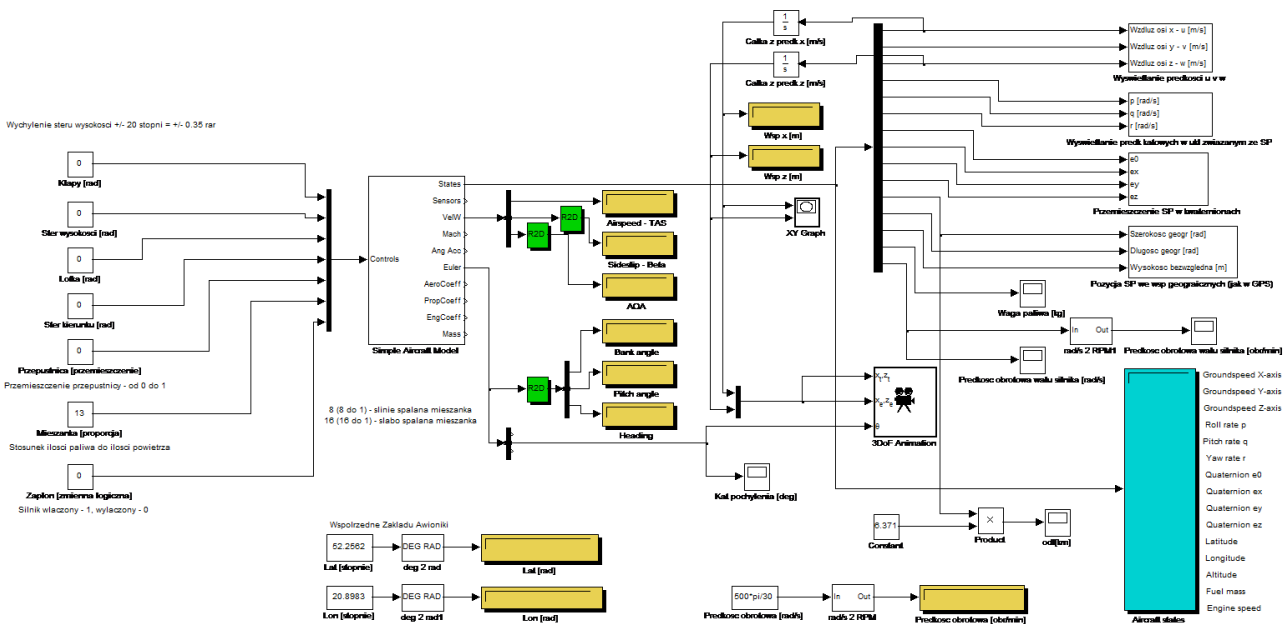
Zatem, system zaprojektowany w środowisku MATLAB/Simulink może być testowany w środowisku symulacyjnym pod względem poprawności zastosowanych algorytmów i ich para-

metrów [9]. Kolejnym krokiem powinno być przeniesienie przebadanych rozwiązań ze środowiska symulacyjnego do układu mikroprocesorowego, który jest dedykowany do implementacji w projektowanym systemie.

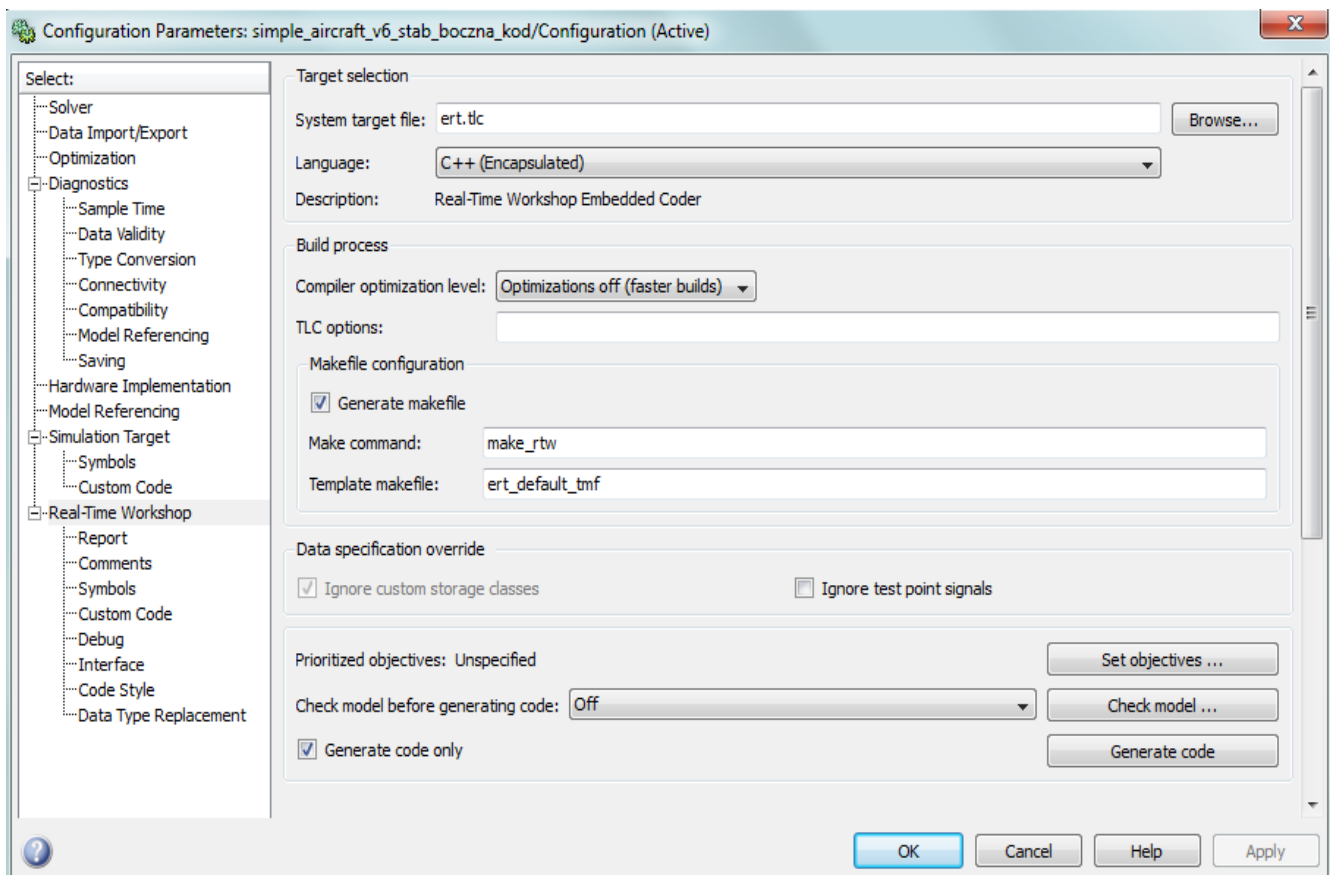


Rys. 5. Dobór regulatora PID przy pomocy narzędzia PID Tuner w MATLAB

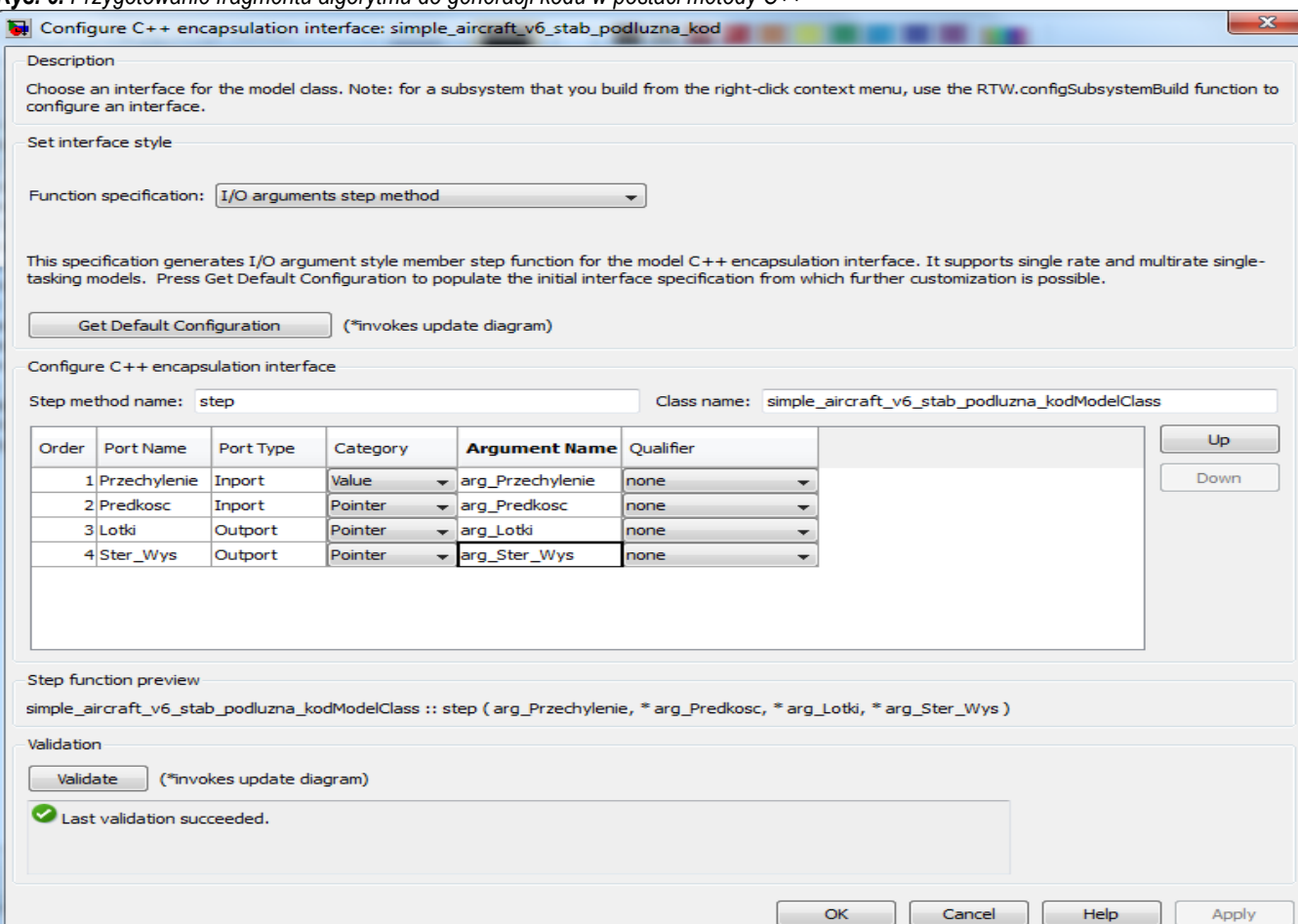
W przypadku złożonych systemów przełożenie modelu blokowego na kod programu działający w systemie wbudowanym może okazać się trudne do wykonania. Na tym etapie wykorzystano narzędzie *Embedded Coder*, które buduje kod C/C++ ze skryptów w języku MATLAB oraz z modeli Simulinka, których działanie odzwierciedla zaprojektowany algorytm (Rys. 6). Wygenerowany kod może być następnie bezpośrednio użyty w mikroprocesorowych systemach wbudowanych i w symulatorach czasu rzeczywistego. Uzyskany w ten sposób kod wymaga następnie rewizji ze strony programisty pod kątem usunięcia nadmiarowych elementów takich jak np. niewykorzystywane zmienne i metody, jednoelementowe macierze i wektory itp. Przy złożonych systemach metoda analizy i weryfikacji wygenerowanego kodu okazuje się jednak skuteczniejsza i prowadząca szybciej do rozwiązania końcowego niż budowanie kodu o takiej samej funkcjonalności bez wsparcia generatora.



Rys. 4. Model dynamiki bezałogowego statku powietrznego w MATLAB/Simulink



Rys. 6. Przygotowanie fragmentu algorytmu do generacji kodu w postaci metody C++

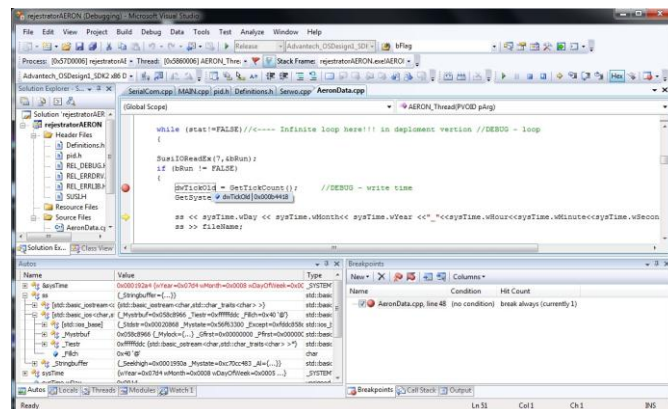


Rys. 7. Konfiguracja parametrów wejściowych i wyjściowych definiowanej metody

Korzystając z opcji generacji kodu C++ do zwartej metody (ang. encapsulation) mamy możliwość wyboru interfejsu metody, czyli sposobu w jaki będzie ona dostępna dla programisty. Wybieramy kolejno formę wprowadzania wszystkich danych wejściowych i wyprowadzania danych wyjściowych. Dla danych wyjściowych jednego obiektu wybiera się pomiędzy wyprowadzeniem danych przez wartość w parametrze będącym wynikiem działania funkcji, a wyprowadzeniem przez wskaźnik podany w argumentach funkcji. Dla danych wejściowych pozostaje wybór między wprowadzeniem przez wartość a wprowadzeniem przez wskaźnik do zmiennej podanej w argumentach metody. Możliwość wyboru sposobu wprowadzania i wyprowadzania parametrów z metody jest istotna ze względu na perspektywę zastosowania w oprogramowaniu sterownika (Rys. 7).

3. WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA OPROGRAMOWANIA

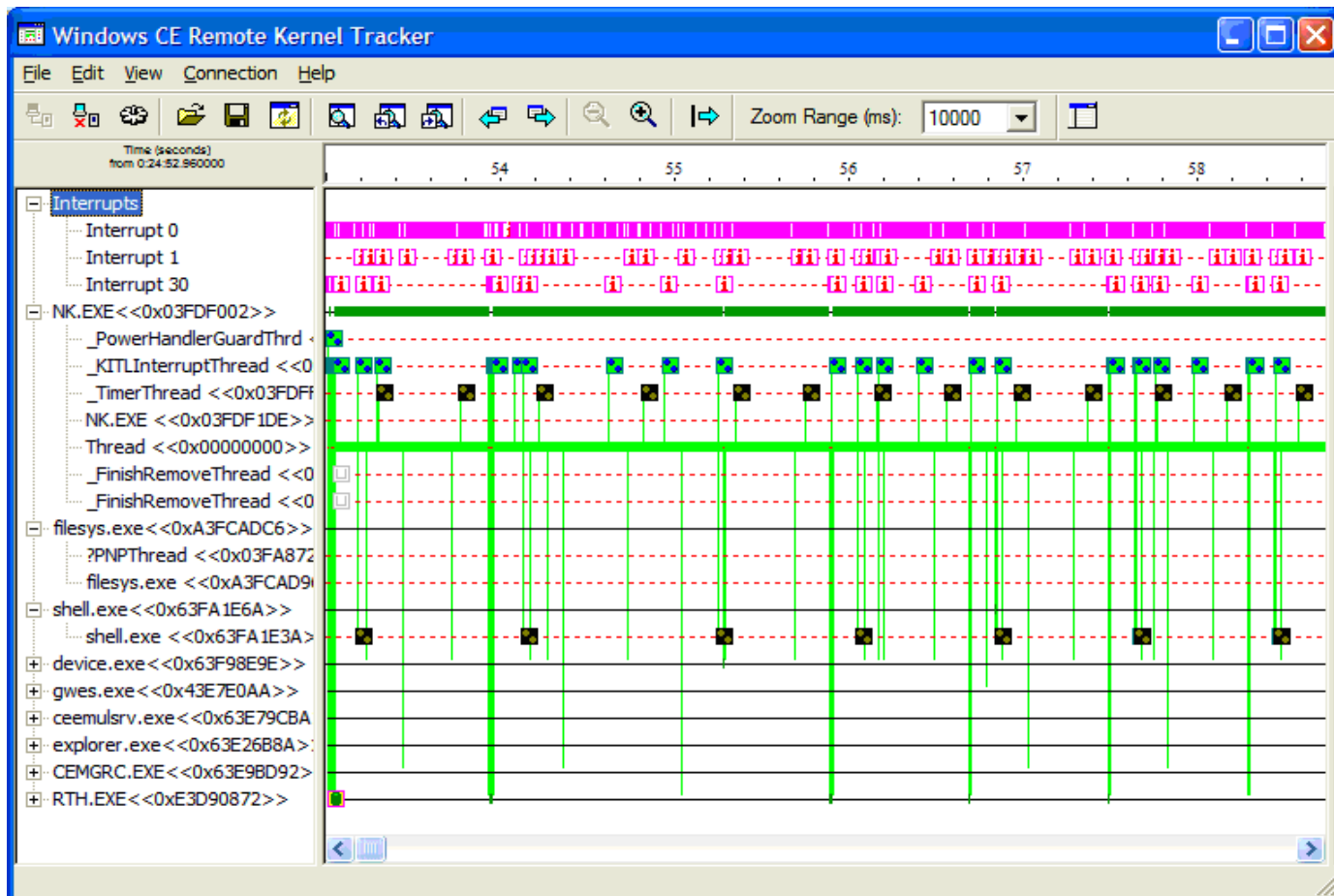
Ostatecznie aplikacja osadzona we wbudowanym systemie operacyjnym [10] działającym na docelowym systemie mikroprocesorowym została poddana testom z wykorzystaniem stanowiska badawczego w układzie HIL. Skuteczność takich testów jest uwarunkowana możliwością ciągłego śledzenia i analizy zachowań poszczególnych modułów aplikacji a także samego systemu operacyjnego. W projekcie wykorzystano dwa niezależne narzędzia. Pierwszym z nich było środowisko programistyczne Visual Studio (Rys. 8), które użyto zarówno do projektowania aplikacji jak i do testów oraz wyszukiwania błędów w programie uruchomionym w sterowniku. Środowisko pozwoliło również na śledzenie stanu zmiennych, kolejności wykonywania metod oraz wyłączenia wątków w ramach badanej aplikacji.



Rys. 8. Analiza kodu aplikacji w czasie jej działania w środowisku Visual Studio

Drugim wykorzystanym narzędziem był Kernel Tracker. Zastosowanie tego narzędzia pozwoliło na śledzenie wszystkich uruchomionych w systemie operacyjnym procesów i ich wątków (Rys. 9).

Narzędzie to łączy z czasem informację uzyskaną w Visual Studio o tym jakie operacje zostały wykonane. Dane wyświetlone na osi czasu umożliwiają weryfikację momentu wywołania i zakończenia działania każdej operacji ale także pozwalają ustalić interakcje wątków w ramach jednego lub kilku procesów. Jest to drugi sposób sprawdzenia poprawności kolejności wykonania i wyłączenia wątków w procesie jednej aplikacji natomiast w przypadku wykorzystywania kilku uruchomionych jednocześnie aplikacji to podstawowe narzędzie do kontroli ich współdziałania.



Rys. 9. Analiza procesów systemu operacyjnego podczas pracy aplikacji

PODSUMOWANIE

Szereg przedstawionych narzędzi do wspomagania procesu projektowania systemu awionicznego bezzałogowego statku powietrznego pozwala w kolejnych etapach wspomóc projektanta w zakresie doboru metod, algorytmów i współczynników oraz dostarcza niezbędnej informacji o zbudowanej aplikacji i jej działaniu pod kontrolą systemu operacyjnego. Wykorzystanie narzędzi symulacyjnych z jednej strony może zastąpić metody obliczeniowe stosowane np. przy doborze regulatorów, badaniu stabilności czy wyznaczaniu trajektorii lotu w zadaniach nawigacyjnych. Z drugiej strony narzędzia te pozwalają na wcześniejszą weryfikację zastosowanych rozwiązań już w okresie testów systemu w układzie HIL, który może być prowadzony w czasie rozwoju systemu przed pierwszymi próbami w locie [11].

BIBLIOGRAFIA

1. Brzozowski B., Sobieraj W., Wojtowicz K., „Organizacja procesu projektowania systemu sterowania BSP z wykorzystaniem symulacyjnej platformy badawczej” *Mechanika w lotnictwie*, tom II/II, Warszawa 2012, s. 459-468.
2. Mueller E.R., *Hardware-in-the-loop Simulation Design for Evaluation of Unmanned Aerial Vehicle Control Systems*, AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, (2007), AIAA Paper 07-6569
3. McManus I.A., Greer D.G., Walker R. A., *UAV Avionics 'Hardware-in-the-Loop' Simulator*, Australian International Aerospace Congress (2003)
4. Astuti G., Longo D., Melita C. D., Muscato G., Orlando A., *HIL Tuning of UAV for Exploration of Risky Environments*, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 5, No. 4 (2008), pp. 419-424
5. Brzozowski B., Sobieraj W., Wojtowicz K., „Simulation Method of UAV Avionics System Optimization”, *Solid State Phenomena*, Vol. 198(2013), pp. 238-242
6. Baranowski L. Identyfikacja właściwości dynamicznych obiektów latających na podstawie badań w locie : sprawozdanie końcowe z realizacji pracy badawczej Nr 225/2004 / WAT, 2007.
7. Kaźmierczak K., Rochala Z., Wojtowicz K. „Metoda generowania modelu dynamiki statku powietrznego zastosowana w symulatorze kabiny samolotu pasażerskiego” *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 288 (t.XXX)*, *Mechanika 85 (4/13)*, październik-grudzień 2013, s. 445-453.
8. Kaźmierczak K., Sobieraj W. – Uproszczony sposób tworzenia wirtualnego modelu dynamiki lotu bezpilotowego statku powietrznego. *Materiały XVI Konferencji Mechanika w Lotnictwie*, 2014
9. Brzozowski B., Sobieraj W., Wojtowicz K., „Stabilizacja parametrów lotu BSP podczas wznoszenia z wykorzystaniem symulacyjnej platformy badawczej” *Mechanika w lotnictwie*, tom II/II, Warszawa 2012, s. 469-478.
10. Brzozowski B, Rochala Z, Wojtowicz K., *Wielowątkowa aplikacja do akwizycji danych z czujników i urządzeń bezpilotowego statku powietrznego*, rozdział monografii „Wybrane zagadnienia awioniki”, 2011, str. 31-40
11. Kaźmierczak K., Sobieraj W., Wojtowicz K., *The flight simulators of manned and unmanned aerial vehicles*. 4th International Conference on Scientific Aspects of Unmanned Aerial Vehicle (2010) p. 50.

SIMULATION TECHNIQUES
OF UAV AVIONICS SYSTEM
COMPUTER-AIDED DESIGNING**Abstract**

Avionics system development of unmanned aircraft vehicles is a complex process. Therefore, designer experience should be supported by advanced tools for computer-aided design and rapid prototyping. The paper presents tools to support the designer during aircraft dynamics model designing, control and navigation algorithms development as well as software development and testing. Methods of using tools to estimate the aerodynamic characteristics of the aircraft based on the geometrical parameters, tools for computer-aided design of algorithms and automatic code generation and the environment for tracking, analyzing and debugging applications running on embedded operating systems were described.

Autorzy:

mgr inż. **Bartosz Brzozowski**,

dr inż. **Zdzisław Rochala**,

kpt. dr inż. **Konrad Wojtowicz** – Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Zakład Awioniki i Uzbrojenia Lotniczego