

ANALIZA STEROWANIA WIRNIKIEM ŚMIGŁOWCA BEZPILOTOWEGO

Maciej Parafiniak

Instytut Lotnictwa

Streszczenie

Praca poświęcona jest zagadnieniom związanym ze sterowaniem wirnika śmigłowca bezzałogowego, którego układ konstrukcyjny – w tym układ sterowania - jest zbliżony do konstrukcji śmigłowców załogowych. Analizie poddano pojedynczy tor sterowania wykorzystujący jako element wykonawczy siłownik hydrauliczny pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego.

Zasadnicza część pracy opisuje zastosowanie programów wspomagających projektowanie do modelowania i symulacji przebiegu procesu sterowania, wykorzystanych podczas opracowania stanowiska do prób toru sterowania wirnikiem i badania siłownika elektrohydraulicznego.

Wykorzystując środowisko Matlab/Simulink zbudowano model cyfrowy stanowiska oraz przeprowadzono symulacje pozwalające ocenić prawidłowość założeń konstrukcyjnych oraz ocenę jakości sterowania jak też właściwości dynamicznych i statycznych siłownika jako elementu układu wykonawczego.

Zrealizowane prace potwierdziły, że zastosowanie serwomechanizmów elektro-hydraulicznych może zapewnić prawidłowość sterowania wirnikiem śmigłowca. Po zastąpieniu pilota przez układ pilotażowo-nawigacyjny, który realizowałby kompletne sterowanie obiektem, z tym zestawem siłowników: do obsługi wirnika, śmigła ogonowego i silnika, możliwe staje się sterowanie bezzałogowymi aparatami latającymi.

1. WSTĘP

Rozwiązywanie zagadnień związanych z ogólną problematyką sterowania i regulacji, stanowi płaszczyznę badawczą dla inżynierów tworzących algorytmy sterowania, mające również zastosowanie w lotnictwie. Stosowanie napędów elektrohydraulicznych, zwłaszcza jako układów regulacji prędkości, położenia, siły czy synchronizacji pracy różnych elementów, daje możliwość budowy wysokosprawnych i precyzyjnych układów sterowania bezzałogowych aparatów latających (takimi jak samoloty i śmigłowce).

Zasadnicza część pracy poświęcona jest zagadnieniom analizy wyodrębnionego toru sterowania przeznaczonego do budowy układu zapewniającego prawidłowość i stabilność sterowania wirnikiem śmigłowca bezpilotowego. Uwzględniono sposób sterowania takiego rodzaju śmigłowca, zaproponowano jako element wykonawczy siłownik elektrohydrauliczny oraz dobrano wstępne parametry dla elementów toru sterowania. Celem jest przygotowanie układu sterowania zapewniającego autonomiczne sterowanie śmigłowcem bezzałogowym.

Współczesne programy komputerowe wspomagają zarówno prace projektowe jak i analityczne, umożliwiając realizację eksperymentów poprzez modelowanie, symulację i wizualizację

wyników opisujących zachowanie obiektu badań. Umożliwiają również analizę i weryfikację modeli stanowisk badawczych przeznaczonych do prób laboratoryjnych jak również całych systemów i układów sterowania. Programy takie mają również swoje zastosowanie w optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych, identyfikacji błędów oraz prognozowaniu niezawodności, ograniczając koszty i pracochłonność związaną z badaniami laboratoryjnymi.

Celem opracowania cyfrowego modelu toru sterowania stanowiska badawczego było dokonanie oceny możliwości wykorzystania takiego toru sterowania zbudowanego z wybranych elementów o zdefiniowanych parametrach, do sterowania pracą wirnika oraz weryfikacji i porównania wstępnych wyników otrzymanych z badań doświadczalnych i rezultatów symulacji. Dodatkowo opracowany model miał za zadanie przygotować możliwość badania dynamicznie złożonych układów hydraulicznych, z dokładnością przyjętą w praktyce, przy wykorzystaniu metody symulacji komputerowej stanowiącej eksperyment cyfrowy.

Wykorzystując program do komputerowego wspomaganie projektowania (MATLAB/SIMULINK) stworzono model układu sterowania przeznaczonego do sterowania wirnikiem śmigłowca bezzałogowego, będący elementem stanowiska badawczego do prób siłownika. Biblioteka Simulinka o nazwie Hydraulic Blockset zawiera modele cyfrowe elementów hydraulicznych przydatnych do symulacji złożonych układów regulacji. Program ten może służyć też jako pomoc wykorzystywaną podczas procesu dobierania nastaw regulatorów.

2. PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA DOTYCZĄCE STEROWANIA ŚMIGŁOWCEM

Pomimo że śmigłowce są nieliniowymi, najczęściej niestabilnymi układami dynamicznymi, o parametrach silnie zależnych od czasu, cechują się imponującymi osiągnięciami i zaletami, jeśli sterowane są przez dobrze wyszkolonego pilota. Takie szkolenie wymaga dużo czasu i jest kosztowne, a efekty uzależnione są od możliwości kandydata.

Te powody skłaniają i motywują badaczy do projektowania i konstruowania systemów automatycznego sterowania, które nie tylko zapewniają wspomaganie pilota poprzez stabilizację śmigłowca i poprawne sterowanie po zadanej trajektorii lotu ale również umożliwiają zastąpienie go podczas wybranych manewrów lub w wybranych fazach lotu. Dalszym krokiem jest zastosowanie autonomicznych bezpilotowych układów sterowania.

Sterowanie automatyczne powinno zapewniać prawidłowość realizacji funkcji oraz wypełnienie zadania przy zachowaniu odporności na zakłócenia zewnętrzne i wewnętrzne. Rozwój dziedziny mikrokontrolerów, nowych technologii budowy sensorów pomiarowych, układów wieloprocessorowych, nowoczesnych napędów, czy układów zasilania stworzyły możliwości do budowania coraz to lepszych bezzałogowych obiektów, co pośrednio znacznie obniżyło koszty budowy, a tym samym przyczyniło się do popularyzacji tej dziedziny.

Oprócz aspektów czysto badawczych śmigłowce są bardzo atrakcyjne dla rynku handlowego, między innymi z powodu możliwości wykonywania zawisu oraz zdolności do pionowego startu i lądowania.

Sterowanie śmigłowcem – bezzałogowym czy załogowym – jest realizowane w dość złożony sposób. Pilot za pomocą dźwigni skoku ogólnego i mocy może zmieniać kąt nastawienia wszystkich łopat jednocześnie. Ruch tej dźwigni często jest sprzężony z układem regulacji mocy silnika(ów) co powoduje, że zwiększaniu kąta nastawienia łopat (np. podczas startu) towarzyszy wzrost mocy przekazywanej na wirnik z zespołu napędowego. Zapewnia to utrzymanie prędkości obrotowej wirnika nośnego w określonym zakresie oraz umożliwia regulację siły nośnej wirnika, niezależnie od prędkości postępowej w płaszczyźnie poziomej. Tak sterowany śmigłowiec może płynnie przemieszczać się wzdłuż osi pionowej (tzn. w górę lub w dół), zdolny jest do wykonywania zawisu – stanu w którym nie jest wykonywane żadne przemieszczenie.

Pilot poprzez odpowiednie wychylenie drążka sterowego, dzięki okresowej zmianie kąta nastawienia łopat (sterowanie okresowe), realizuje zmianę nachylenia płaszczyzny łopat

umożliwiający ruch śmigłowca w dowolnym kierunku: przód-tył oraz prawo-lewo ruchem postępowym, bez wykonywania obrotu względem osi wirnika głównego tj przy zachowaniu kierunku ustawienia kabiny pilota. Wychylenie drążka sterowego w lewo, powoduje przechylenie wektora ciągu wirnika nośnego w lewo, powstanie składowej poziomej ciągu powodującej przemieszczanie śmigłowca oraz wytworzenie momentu względem jego środka ciężkości i obrót wokół osi podłużnej (przechylenie). Odpowiedź wirnika następuje w opóźnieniu w stosunku do zmiany kąta nastawienia łopaty, co związane jest z tzw. kątem wyprzedzenia sterowania, zależnym od zamocowania łopaty.

Zmiana kąta odchylenia śmigłowca w układzie klasycznym, którą pilot realizuje poprzez sterowanie orczykiem (pedałami), dokonuje się poprzez zmianę kąta skoku ogólnego śmigła ogonowego. Śmigłowiec nie wykonuje żadnego ruchu obrotowego względem osi wirnika głównego (lub wykonuje ruch obrotowy ze stałą prędkością kątową) jeżeli siła ciągu śmigła ogonowego równoważy moment siły pochodzący z napędu wirnika nośnego.

Drążków skoku ogólnego używa się również do zrównoważenia ciągu wirnika nośnego w celu uzyskania dogodnych warunków lotu ustalonego w przód oraz do regulowania wysokości w zawiśnię. Zmieniają one jednakowo skok ogólny wszystkich łopat wirnika, by wpływać wyłącznie na wielkość siły ciągu, a nie na kierunek jej wektora. Podobne zadanie wykonują pedały, które równoważą moment obrotowy oraz pomagają regulować kierunek lotu. Jedyną różnicą w sterowaniu łopatami wirnika śmigła ogonowego jest fakt, iż skok ogólny śmigła jest zmienny, by kontrolować moment odchylający, który wynika z rzeczywistego ramienia względem środka ciężkości. Przepustnicą kontrolujemy ciąg i prędkość lotu w ruchu postępowym, a także utrzymanie zadanej stałej prędkości wirnika.

Układ sterowania śmigłowcami modelarskimi w większości przypadków posiada prostszą budowę. Są one najczęściej wyposażone w wirnik w układzie Hillera z pomocniczym wirnikiem sterującym, który zachowuje się jak giroskop, oraz elektroniczne układy stabilizacji. Przemieszczenie kątowe wirnika sterującego względem osi obrotu przy użyciu drążka skoku okresowego do sterowania wirnikiem pomocniczym powoduje pochylenie płaszczyzny łopat wirnika głównego, a łopatki aerodynamiczne wirnika sterującego tworzącego giroskop spełniają dwie funkcje: działają jako serwomechanizm dla sterującego sygnału wejściowego oraz zapewniają tłumienie.

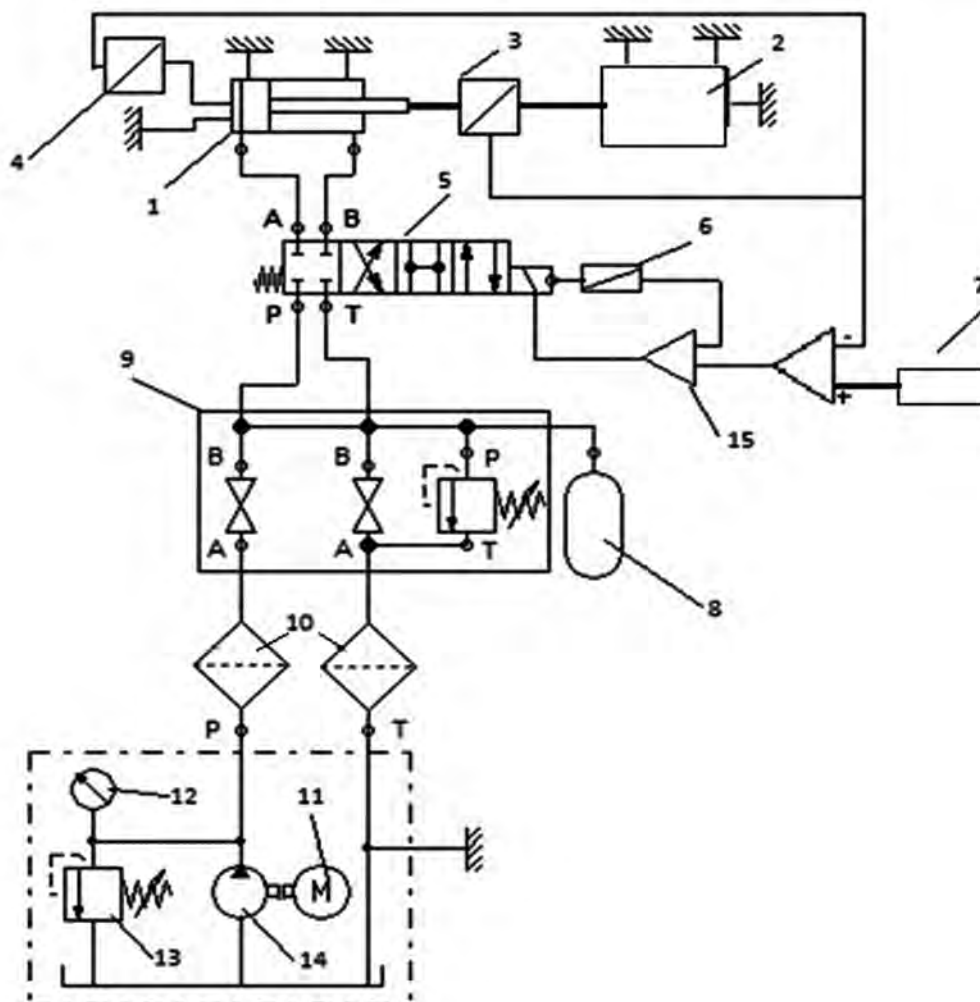
W dalszej pracy do budowy modelu symulacyjnego toru sterowania i jego analizy przyjęto wstępnie rozwiązanie śmigłowca bezpilotowego o konstrukcji układu sterowania zbliżonego do klasycznej konstrukcji śmigłowców załogowych.

3. MODEL SYMULACYJNY TORU STEROWANIA OPARTY NA ROZWIĄZANIU DLA STANOWISKA BADAWCZEGO

Układy sterowania śmigłowca bezpilotowego mają złożoną konstrukcję i pełnią nie tylko funkcję sterowania pierwotnego, jak i stabilizującą. Śmigłowce są najczęściej konstrukcjami dynamicznie niestabilnymi, więc ich położenie musi być nieustannie korygowane za pomocą układu stabilizującego. Dodatkowo sterowanie utrudnione jest przez efekt sprzężenia skośnego, co wymaga aby w przypadku pobudzenia jednego urządzenia sterującego kontrolować pozostałe w celu wykonania pożądanych manewrów. Wszystkie wejściowe sygnały kontrolne wywołują pochylenie płaszczyzny końców łopat wirnika oraz moment w pobliżu środka ciężkości śmigłowca. Możemy zatem przy pomocy poleceń sterować kątem odchylenia, pochylenia oraz kątem przechylenia śmigłowca. Rezultatem tych sterowań są powstające siły w osi podłużnej i poprzecznej i ostatecznie pożądany ruch śmigłowca. Zmuszeni jesteśmy jednak do uwzględnienia pewnych wyrównawczych sygnałów wejściowych, ponieważ większość wejść sprzęgnięta jest z ruchem pozaosiowym.

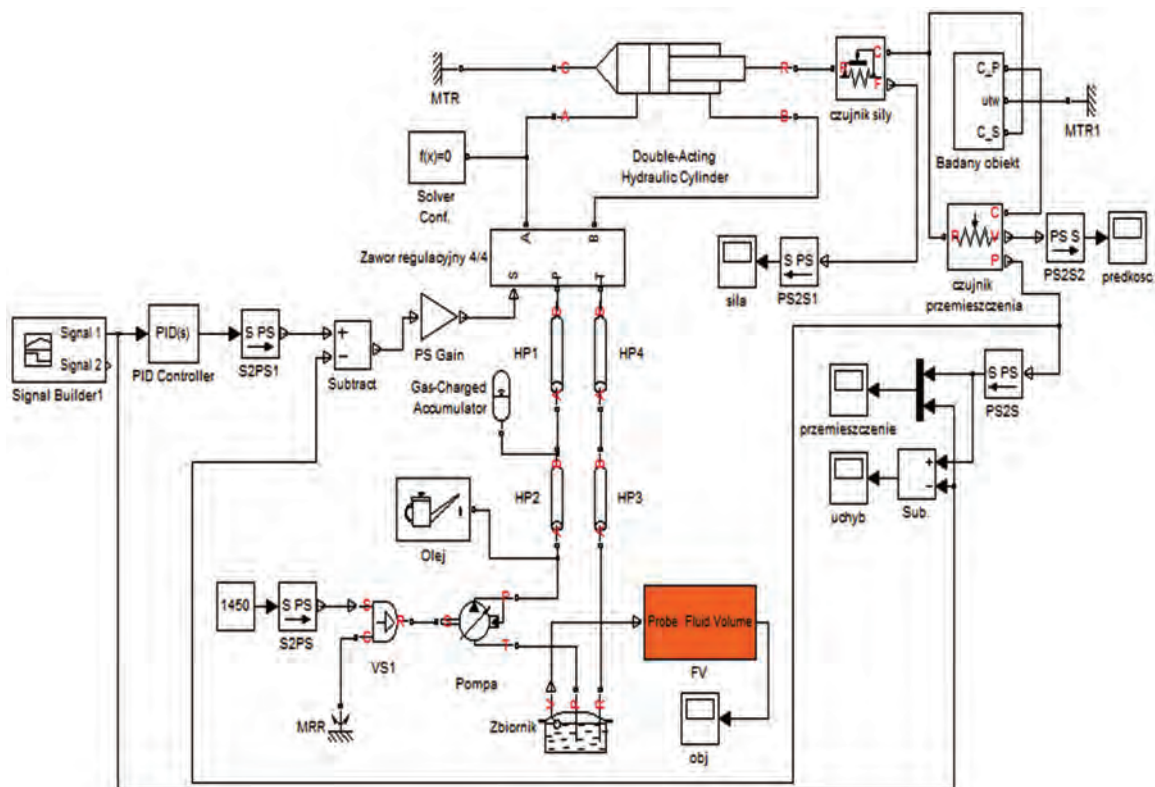
W celu zbadania zachowania się układu sterującego, opartego na elektrohydraulicznym serwonapędzie, zaprojektowano model symulacyjny odzwierciedlający zachowanie się wyodrębnionego toru sterowania takiego układu opartego na rozwiązaniach sterowania wirnikiem opracowanego w Instytucie Lotnictwa dla śmigłowca IS-2 IB i hydraulicznie wspomaganym układzie sterowania lotem, który zbliżony jest do rozwiązań zastosowanych w śmigłowcu Robinson.

Model do analizy oparto na stanowisku do badań (Rys. 1), zawierającym pojedynczy tor sterowania wykorzystujący hydrauliczny siłownik sterowany za pomocą komputera zastępującego pilota oraz towarzyszące mu układy pomiarowe i zasilające. Stanowisko to składa się z siłownika dwustronnego działania (cylinder z tłoczyskiem jednostronnym z przetwornikiem pomiarowym przemieszczenia), zaworu regulacyjnego 4/4 z tuleją (sterowany bezpośrednio, z elektrycznym sprzężeniem zwrotnym od przemieszczenia tłoczka i wbudowanym elektronicznym układem sterującym), pompy z regulacją ciśnienia napędzaną silnikiem elektrycznym (stałe obroty), akumulatora membranowego (objętość 1l), czujnika siły i elementu obciążenia zastępczego (tłumik śmigłowca IS-2).



Rys. 1. Schemat stanowiska do prób badania siłownika: 1 - siłownik, 2 - obciążenie zastępcze, 3 - czujnik siły, 4 - czujnik przemieszczenia, 5 - serwozawór, 6 - zadajnik proporcjonalny, 7 - sygnał sterowania, 8 - akumulator, 9 - zawory pomocnicze, 10 - filtry, 11 - silnik pompy, 12 - manometr, 13 - zawór

W oparciu o schemat stanowiska (Rys. 1) zbudowano w programie Matlab/Simulink model symulacyjny (Rys. 2).



Rys. 2. Model symulacyjny układu stanowiska do prób badania siłownika

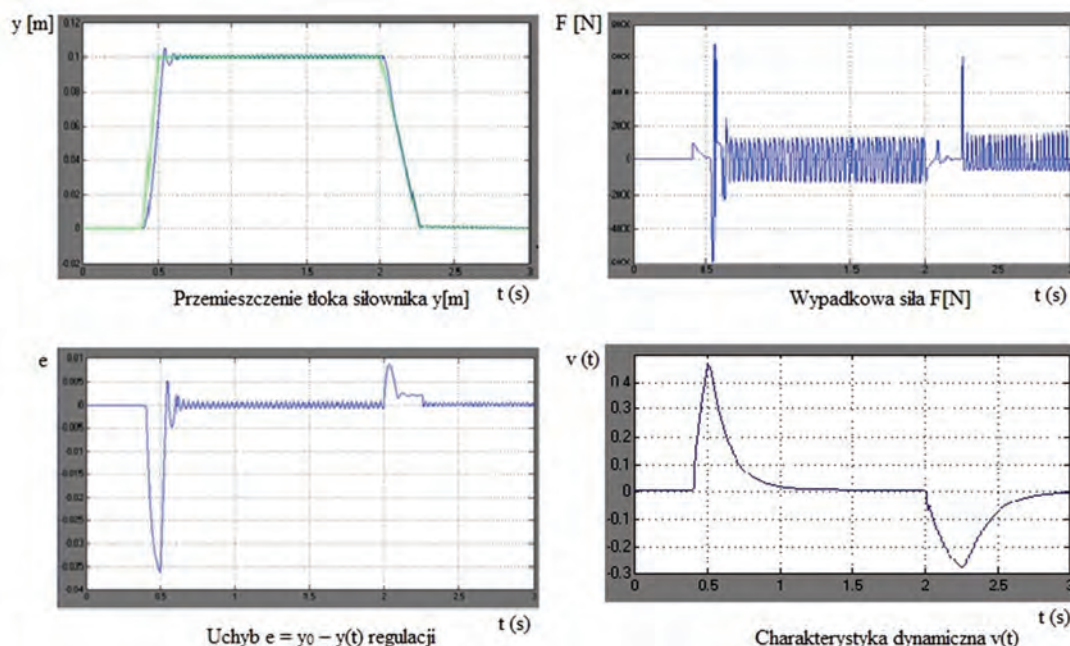
W Tabeli I zamieszczono wybrane parametry opisujące na potrzeby modelu do symulacji elementy serwonapędu oraz przetworniki i elementy sterujące. Program do realizacji symulacji pozwala na bardzo szybkie zmiany parametrów, dlatego jego zastosowanie może być w każdej chwili dostosowane do innych elementów. Do symulacji wykorzystano parametry katalogowe, parametry z charakterystyk statycznych oraz dane wyznaczone doświadczalnie.

Tabela I. Parametry elementów symulacji serwonapędu hydraulicznego

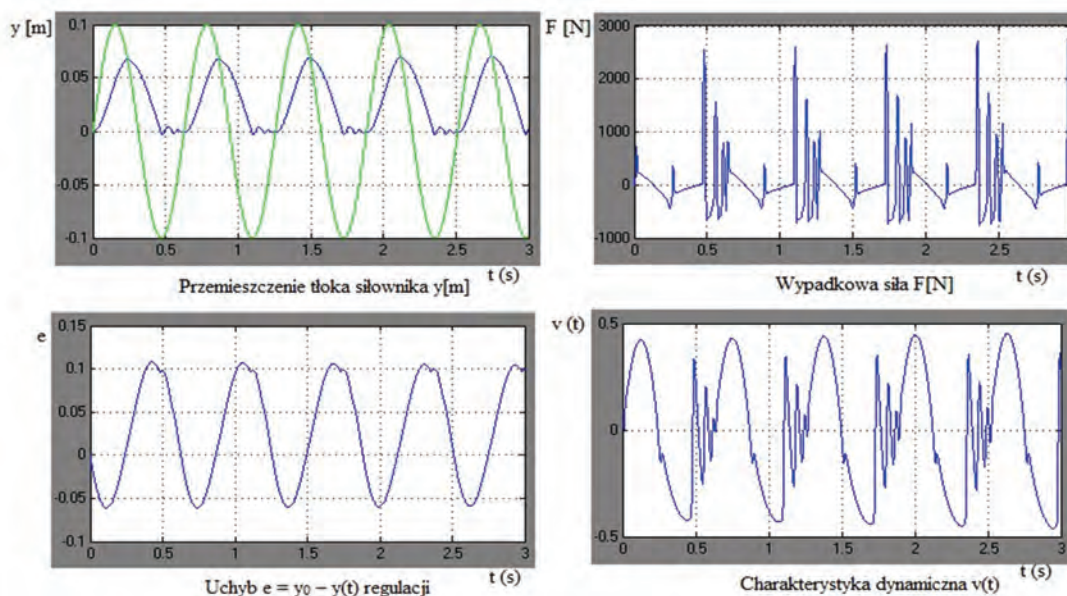
Nazwa	Parametry
Pompa	$V_p = 15 \text{ cm}^3/\text{obr}$; $Q_p = 15,4 \text{ dm}^3/\text{min}$; $p_{max} = 8 \text{ MPa}$; $n = 990 \text{ obr/min}$; $P = 2,4 \text{ kW}$
Akumulator	$V_g = 1 \text{ dm}^3$; $T_g = 55^\circ\text{C}$; $p_o = 2 \text{ MPa}$; $p = 6 \text{ MPa}$
Siłownik	Średnica tłoczka $D = 40 \text{ mm}$; Średnica tłocyska $d = 28 \text{ mm}$; Skok $j = 150 \text{ mm}$
Rozdzielacz	4/4 z tuleją; Natężenie przepływu 70 bar
Silnik	1450 obr/min
Olej	AMG-10

Model symulacyjny (Rys. 2) służy do analizy pracy i dokładności pozycjonowania siłownika obciążonego tłumikiem, po wprowadzeniu dowolnie ukształtowanego sygnału sterującego. Podczas takich symulacji możemy obserwować dowolne parametry stanu oraz zmiany parametrów w czasie. Dzięki zastosowaniu czujnika przemieszczenia i siły możemy na oscyloskopie zarejestrować przemieszczenie $y(t)$, prędkość $v(t)$ oraz siły działające na tłumik. Porównując sygnał zadany z otrzymanym możemy w łatwy sposób uzyskać uchyb regulacji $e = y_0 - y(t)$.

Dla przyjętych parametrów regulacji (dobre nastawy regulatora PID) i sposobu sterowania - wymuszenie sygnałem trapezowym i sinusoidalnym - przedstawiono odpowiednio na Rys. 3 i 4: uzyskane przemieszczenie $y(t)$ tłoka siłownika według zadanego sygnału y_0 , uchyb regulacji $e(t)$, wypadkową siłę $F(t)$ w układzie oraz charakterystykę dynamiczną $v(t)$.



Rys. 3. Zmiany parametrów w czasie: przemieszczenie $y(t)$, prędkość $v(t)$, siły działające na obciążenie zastępcze $F(t)$, uchyb symulacyjny układu $e(t)$ dla sterowania sygnałem prostokątnym



Rys. 4. Zmiany parametrów w czasie: przemieszczenie $y(t)$, prędkość $v(t)$, siły w układzie $F(t)$, uchyb symulacyjny układu $e(t)$ - dla sterowania sygnałem sinusoidalnym

4. WNIOSKI

Ogromną zaletą cyfrowego modelu toru sterowania stanowiska do badań, jest możliwość aranżowania różnych elementów hydraulicznych i mechanicznych. Istnieje także możliwość doboru nastaw regulatora, co prowadzi do dokładniejszego i bardziej efektywnego sterowania.

Zaprojektowany model symulacyjny pozwala na obserwacje różnych parametrów stanu oraz korygowanie pojawiających się błędów. Dużą zaletą jest także bezinwazyjne testowanie oraz zbieranie charakterystyk dynamicznych i statycznych badanego obiektu.

Model utworzony w środowisku Simulink umożliwia ponadto: monitorowanie, gromadzenie i udostępnianie danych, a także rozbudowę modelu i integrację z innymi modelami układów sterowania.

Tak realizowane testy są szybsze i tańsze, umożliwiają wygodniejsze wprowadzenie zmian do obiektu i układu sterowania, ułatwiają dobór elementów i ich parametrów w celu większej zgodności z układem rzeczywistym oraz ocenę możliwości zastosowania takiego typu toru sterowania jako elementu układu sterowania wirnikiem śmigłowca.

Zrealizowane próby potwierdziły prawidłowość założeń i koncepcji toru sterowania, umożliwiły dobór parametrów regulatora oraz zweryfikowały poprawność modelu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fahad A., Al Mahmood: *Constructing & Simulating a Mathematical Model of Longitudinal Helicopter Flight Dynamics*.
- [2] Mrozek B., Mrozek Z.: *MATLAB i Simulink. Poradnik użytkownika*, Wydawnictwo HELION, Gliwice, 2004.
- [3] Nawrat A.: *Modelowanie i sterowanie bezzałogowych obiektów latających*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009.
- [4] Padfield G. D.: *Dynamika lotu śmigłowców. Teoria i wykorzystanie właściwości lotnych i modeli symulacyjnych*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1996.
- [5] Dindorf R.: *Modelowanie i symulacja nieliniowych elementów i układów regulacji napędów płynowych*, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce, 2004.

Maciej Parafiniak

ANALYSIS THE CONTROL OF THE ROTOR OF THE UNMANNED HELICOPTER

Abstract

The goal of this report is related with the control of the rotor of the unmanned helicopter, whose construction design – including the control system – is similar to the construction design of manned helicopters. The object of analysis is a single control circuit, consisting of a hydraulic cylinder actuator operating in a feedback loop.

The main part of the report describes the use of CAD programs for modelling purposes and the simulation of the control process. The same CAD programs were used during the design of the rotor control test station and the electro-hydraulic actuator control analysis.

Matlba/Simulink was used to construct a digital model of the test station, as well as used to perform simulations allowing allowing to asses the accuracy of the quality of the construction, as well as the quality of the steering, as well as the dynamic and static properties of the actuator as a part of the executive system.

The finalized work has confirmed that the use of electro-hydraulic servo-mechanisms can assure a correct control of the rotor. After replacing the pilot with a pilot-navigation system, which would have a complete control of the object, and with the addition of of the electro-hydraulic actuators used to control the rotor, tail propeller and engine, the control of the unmanned helicopter through these apparatuses becomes possible.