FLIGHT TESTS OF THE UNMANNED HELICOPTER ILX-27 – SOME SELECTED ISSUES

ZAGADNIENIA PRÓB W LOCIE BEZZAŁOGOWEGO ŚMIGŁOWCA ILX-27

Jarosław Hajduk, Ryszard Sabak

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

e-mail: jaroslaw.hajduk@itwl.pl; ryszard.sabak@itwl.pl

Abstract: *The unmanned helicopter ILX-27 has been designed and developed under the NCBR (in English, NCRD – National Center for Research and Development) project on the “Unmanned helicopter – a special-purpose aerobot” carried out by the Institute of Aviation (IL) and the Air Force Institute of Technology (ITWL), both in Warsaw, and the Military Aviation Works No. 1 J.S.C. in Łódź (WZL Łódź). The helicopter in question is a design initiated and developed solely as an unmanned vehicle in the weight category (MTOW) of 1100 kg. It is the outcome of a complex approach to issues of the helicopter’s structure and aerodynamics, and those of controlling it at different flight phases. From the very beginning, flight tests of this unmanned helicopter have been carried out under the remote-control mode of operation. The paper has been intended to present the outcomes of some selected stages of the project, i.e. the study and tests of ground-control components, and the flight tests.*

Keywords: UAV

Streszczenie: *Bezzałogowy śmigłowiec ILX-27 został opracowany w ramach projektu NCBiR pt. „Bezzałogowy śmigłowiec - robot do zadań specjalnych”. Śmigłowiec został zaprojektowany od podstaw jako statek bezzałogowy w klasie masowej - 1000kg. Jest wynikiem kompleksowego podejścia do zagadnień wiążących zasady aerodynamiki w różnych stanach lotu z uwzględnieniem wpływu strumienia śmigłowego oraz indywidualnych cech układu sterowania automatycznego. Jest to nowa konstrukcja. W artykule przedstawiono wyniki ostatnich etapów projektu: badań i prób elementów sterowania na stanowisku naziemnym oraz prób w locie podczas zawisu.*

Słowa kluczowe: BSP,

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Najczęściej i najspektakularniej są one wykorzystywane w czasie działań wojskowych. Wśród bezzałogowych statków powietrznych możemy wyróżnić dwie grupy: najbardziej rozpowszechnioną – samoloty oraz coraz bardziej zwiększającą swoje możliwości – śmigłowce. Jedną z możliwych klasyfikacji bezzałogowych statków powietrznych ze względu na zasięg działania, pułap i długotrwałość lotu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1 klasyfikacja bezzałogowych statków powietrznych

Kategoria	Nazwa skrócona	Zasięg [km]	Pułap [km]	Czas lotu [h]
UAV SZCZEBŁA TAKTYCZNEGO I OPERACYJNEGO				
Mikro	μ	< 10	0,25	1
Mini	MINI	< 10	0,35	< 2
Bliskiego zasięgu	CR	10 ÷ 30	3	2 ÷ 4
Krótkiego (małego) zasięgu	SR	30 ÷ 70	3	3 ÷ 6
Średniego zasięgu	MR	70 ÷ 200	3 ÷ 5	6 ÷ 10
Średniego zasięgu i wydłużonej długotrwałości lotu	MRE	do 500	5 ÷ 8	10 ÷ 18
Niskiego pułapu i głębokiego przenikania	LADP	> 250	0,05 ÷ 8	0,5 ÷ 1
Niskiego pułapu i wydłużonej długotrwałości lotu	LAE	> 500	3	> 24
Średniego pułapu i dużej długotrwałości lotu	MALE	> 500	5 ÷ 8	24 ÷ 48
UAV SZCZEBŁA STRATEGICZNEGO				
Wysokiego pułapu i dużej długotrwałości lotu	HALE	> 1000	15 ÷ 20	24 ÷ 48
Samolot bezpilotowy o zastosowaniu bojowym	UCAV	> 400	< 20	2
UAV SPECJALNEGO PRZEZNACZENIA				
Bezpilotowe środki atakujące	LETH	> 300	3 ÷ 4	3 ÷ 4
Wystrzeliwane z napędem rakietowym	DEC	0 ÷ 500	0,05 ÷ 5	< 4

Do głównych zadań realizowanych przez bezzałogowe statki powietrzne można zaliczyć:

- rozpoznanie;
- obserwację;
- wykrywanie;
- lokalizację;
- ocenę zniszczeń;
- wsparcie misji poszukiwawczo-ratowniczych;
- śledzenie pojazdów i jednostek morskich;
- analizę skażeń;
- wykonywanie zdjęć lotniczych.

Zadania te mogą być realizowane na potrzeby:

- straży granicznej;
- straży pożarnej;
- policji;
- służb kryzysowych;
- leśnictwa;
- rybołówstwa;
- geologii;
- kartografii.

Jednym z istotnych kierunków prac zarówno w Instytucie Lotnictwa jak i w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych od wielu lat jest rozwój systemów bezzałogowych statków powietrznych. W ostatnich latach w ramach projektu pt. „Bezzałogowy śmigłowiec - robot do zadań specjalnych” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, opracowano bezzałogowy śmigłowiec ILX-27. Śmigłowiec został zaprojektowany od podstaw jako statek bezzałogowy w klasie masowej - 1000kg. Powstał w wyniku kompleksowego podejścia do zagadnień wiążących zasady aerodynamiki w różnych stanach lotu z uwzględnieniem wpływu strumienia śmigłowego oraz indywidualnych cech układu sterowania automatycznego.

Przewidywane parametry śmigłowca:

- zasięg - 400 km
- pułap - 4000 m
- udźwig - 300 kg
- prędkość maksymalna - 215 km/h

2. Stan wyjściowy projektu

W projekcie większość głównych zespołów śmigłowca została zaprojektowana „od podstaw” (głowica wirnika głównego, łopaty wirnika głównego, tarcza sterująca, struktura nośna, przekładnia główna, struktura centralna, struktura ogona, wirnik ogonowy, podwozie, elementy systemu sterowania). Żaden w wymienionych głównych zespołów śmigłowca ILX-27 nie był fragmentem śmigłowca załogowego, a więc nie był wcześniej poddany badaniom w locie. Dlatego też zostały one wszechstronnie przebadane stanowiskowo, a kompletny śmigłowiec przeszedł cykl badań naziemnych (rys. 1). Jednak to zagadnienie realizacja oblotu i prób w locie był jednym z najważniejszych punktów projektu.

Sam prototypowy śmigłowiec od początku projektu nie był przewidziany do instalacji kabiny pilota czy choćby „prowizorycznego” miejsca dla pilota i standardowych organów sterowania, jak często ma to miejsce w przypadku innych projektów UAV w tej klasie masowej (zarówno samolotów jak i śmigłowców). Konsekwencją tego stanu była konieczność przygotowania

prototypu, naziemnej stacji sterowania oraz przeszkolenie członków zespołu do realizacji oblotu i prób w locie w trybie zdalnego sterowania.

Rys. 1 Śmigłowiec ILX-27 na stanowisku prób naziemnych

3. Obszar badawczy

W przypadku projektów, w których poprawność funkcjonowania systemów sterowania i automatyki sterowania jest decydująca dla powodzenia i bezpieczeństwa realizacji lotów (a ma to miejsce w przypadku systemów bezzałogowych) wskazane jest, aby wszystkie elementy systemu sterowania (zarówno hardware jak i software) zabudowane zarówno w aparacie latającym jak i w stacji naziemnej, były przetestowane również w locie. Przed próbami w locie prototypowego śmigłowca prace te – ze względu na ograniczony czas projektu - zrealizowane były tylko w części. Niektóre z elementów (autopilot, stacja naziemna, systemy transmisji danych) były wcześniej stosowane w innych opracowanych w ITWL bezzałogowych statkach powietrznych (rys.2). Niektóre jednak z podsystemów (AHRS, radiowysokościomierz) po integracji z systemem sterowania nie były testowane w locie, podobnie zresztą jak algorytmy sterowania właściwe dla tego typu śmigłowców.

Wstępnie rozważane były następujące typy sterowania prototypem:

- bezprzewodowe zdalne sterowanie śmigłowcem przez operatora naziemnego bez żadnego wsparcia ze strony pokładowych systemów stabilizacji lub automatyzacji lotu. W uproszczeniu ujmując, w sposób zbliżony do sterowania zdalnie kierowanymi modelami latającymi, gdzie ruchy drążków sterowych manipulatora sterowania powodują odpowiednie ruchy tarczy

sterującej, skoku śmigła ogonowego oraz wysterowania mocy zespołu napędowego;

- sterowanie zdalne ze wsparciem autostabilizatorem;
- sterowanie automatyczne, przez pokładowego autopilota z realizacją komend operatora ze stacji sterowania;

Zarówno drugi jak i trzeci wariant sterowania wymagają pełnej wiedzy na temat aerodynamiki obiektu, tak aby współczynniki stabilizacji, czy też ogólnie ujmując prawa sterowania zawarte w algorytmach sterowania współdziałały z dynamiką śmigłowca. Weryfikację opisu śmigłowca (jego modelu matematycznego) można uzyskać np. przez badania w locie jego wersji załogowej, ale tego etapu w projekcie ILX-27 nie planowano.

Rys. 2 Cel powietrzny systemu ZSMCP oraz odrzutowy cel powietrzny - ITWL

Decydując o wyborze systemu sterowania i kontroli śmigłowcem, za optymalny uznano system zdalnego sterowania przez naziemnego pilota-operatora w powiązaniu z telemetrycznym przekazem i prezentacją parametrów lotu w naziemnej stacji kontroli lotu.

Podejmując decyzje o systemie zdalnego sterowania wzięto pod uwagę następujące aspekty konstrukcyjne śmigłowca oraz trudności oceny niebezpieczeństw wynikających z braku doświadczeń w przedstawionych zagadnieniach:

- kompletny wirnik śmigłowca ILX-27 (tak jak i cały śmigłowiec) dotychczas nie latały, jedyne więc informacje na temat jego pracy w śmigłowcu, odpowiedzi na sterowanie i wartości sił obciążających siłowniki miały źródło obliczeniowe – nie było pewności, w jakim stopniu to prototypowe rozwiązanie obciąży człowieka w procesie sterowania (pilota w kabinie lub pilota - operatora zewnętrznego);
- głowica śmigłowca ILX-27 ma konstrukcję przegubową, charakterystyczną dla „klasycznych” śmigłowców. Problemem jest to, że modele zdalnie sterowane wyposażone są zwykle w mechaniczną lub elektroniczną stabilizację, same zaś wirniki główne latających modeli śmigłowców mają zdecydowanie charakter bardziej „sztywny” niż głowice przegubowe, co w połączeniu z wysokimi obrotami skutkuje szybką reakcją, ale też dużym tłumieniem prędkości kątowych;
- zdalne sterowanie śmigłowców wymaga od operatora bardzo precyzyjnej widzialności śmigłowca, gdyż obserwacja kątów orientacji, prędkości kątowych i przesunięć jest praktycznie jedynym źródłem informacji o obiekcie dla koniecznych szybkich i odpowiednich korekt sterowania do utrzymania stabilnej pozycji lub stabilnego stanu lotu. Bardzo dobra widzialność (co oznacza jednak małą odległość między operatorem a śmigłowcem) kłóci się niestety z zasadami bezpieczeństwa;
- bardzo istotnym czynnikiem dla pewności zdalnego sterowania jest wartość opóźnienia pomiędzy stwierdzeniem konieczności korekty sterowania przez operatora a wykonaniem tej korekty. Na sumaryczne opóźnienie toru sterowania składa się wiele czynników. Istotnym było jednak, aby ocenić czy faktyczna wartość opóźnienia jest jeszcze akceptowalna dla konkretnego, sterowanego obiektu;
- przewidywano, że początkowe próby oderwania i zawisu wykonywane będą w bezpośredniej bliskości ziemi, co zwiększa bezpieczeństwo prób, ale niestety przekłada się na lot z wpływem ziemi, a więc w warunkach silnych zakłóceń opływu.

Na część tak zadanych pytań dały odpowiedź prace realizowane przez ITWL w ramach innego równolegle prowadzonego projektu. Opracowano w nim dwie bezzałogowe platformy pionowego startu i lądowania: dwuwirnikowy śmigłowiec w układzie podłużnym o udźwigu 25 kg oraz śmigłowiec w układzie klasycznym o masie startowej około 300 kg i udźwigu 50 kg, stanowiący przebudowę śmigłowca jednomiejscowego na UAV (rys.3). Oba te prototypy podczas oblotu oraz w próbach w locie kontrolowane były systemem zdalnego sterowania ze wsparciem transmisją telemetryczną i prezentacją wyróżnionych parametrów na monitorach stacji naziemnej. Zwłaszcza doświadczenia z cięższym z obiektów okazały się cenne dla projektu ILX-27. Pomimo stosunkowo dużej masy - 300 kg opanowanie kontroli obiektu o zupełnie innych niż modele cechach dynamicznych (wirnik „huśtawkowy”) wymagało zaledwie kilku zawisów i lotów w różnych warunkach aerodynamicznych.

Rys. 3 Śmigłowiec w układzie podłużnym i śmigłowiec w układzie klasycznym podczas prób w locie

4. Badania i próby w locie

W czasie badań i prób w locie wykorzystywano wcześniej stosowaną w ITWL aparaturę zdalnego sterowania oraz naziemne stanowisko kontroli lotu (rys. 4)

Rys.4 Wygląd zastosowanego manipulatora zdalnego sterowania oraz naziemna stacja kontroli lotu

Rys. 5 Śmigłowiec ILX-27 w czasie zawisu

Celem oblotu i pierwszych prób było zebranie danych dotyczących:

- reakcji śmigłowca na sterowanie,
- określenie wysterowań trymowych dla ustalonych stanów lotu,
- dobór optymalnej czułości sterowania (elektronicznego przełożenia pomiędzy ruchami drążków manipulatora a ruchami tarczy sterującej).

Wyniki z oblotów pozwoliły na rozpoczęcie procesu identyfikacji dla weryfikacji modelu matematycznego w celu poprawienia obliczonych wstępnie współczynników stabilizacji i praw sterowania dla autopilota.

W celu określenia wysterowań niezbędnych dla utrzymania stabilnego zawisu (co w dużej mierze przekłada się na obciążenie pilota) wykonano wykresy położenia organów sterowania na tle pełnego (100% w każdą stronę) zakresu sterowania. Na rys. 6 przedstawiono wysterowanie w kanale odchylenia i skoku ogólnego oraz w kanale przechylenia i pochylenia (sterowanie tarczą sterującą), co odpowiada przypisaniu drążków manipulatora zdalnego sterowania.

Analiza zapisów wysterowań w warunkach zawisu ustalonego pozwoliła również na określenie zapasów sterowania w poszczególnych kanałach (rys. 7). Można zauważyć, że dla utrzymania śmigłowca w zawisie wystarczą małe ruchy w poszczególnych kanałach sterujących. Dobrze widoczne mniejsze ruchy sterowania i łatwo czytelne położenia trymowe dla warunków ustalonego zawisu śmigłowca.

Patrząc na wykresy można również zauważyć bardzo mały zapas sterowania w kanale odchylenia (wysterowania skoku śmigła ogonowego). Wydaje się, że modernizacja tego zespołu będzie jedną z istotnych prac przygotowawczych przed kolejnymi lotami próbnymi.

Rys.6. Zapisysterowania śmigłowca ILX-27

a) w kanale odchylenia i skoku ogólnego oraz

b) w kanale przechylenia i pochylenia podczas pierwszych prób zawisu

Rys.7 Zapisysterowania śmigłowca ILX-27 podczas dalszych prób zawisu

a) w kanale odchylenia i skoku ogólnego oraz

b) w kanale przechylenia i pochylenia.

Rejestracja prędkości kątowych, przyspieszeń oraz kątów orientacji była realizowana z częstotnością 50 Hz. Pozwoliło to, w powiązaniu z rejestracją ruchów sterowań na szybką (wręcz podczas sesji lotów) analizę odpowiedzi śmigłowca na sterowanie w wyróżnionych kanałach a również na kontrolę sprzężeń sterowań

między kanałami. Zastosowana uproszczona metoda analizy (konieczna z uwagi na deficyt czasu podczas badań) pozwoliła na oszacowanie poziomu sterowności w głównych kanałach sterowania. Skorygowano również wartości programowych czułości układu sterowania do maksymalnych poziomów bezwzględnych oraz dla poziomów akceptowalnych dla operatora-pilota. Na rys. 8-10 przedstawiono odpowiedzi śmigłowca na wymuszenia w kanałach przechylenia, pochylenia i odchylenia.

Rys.8 Graficzna prezentacja odpowiedzi śmigłowca ILX-27 na wymuszenie w kanale przechylenia o wartości $35^{\circ}/s^2$ dla 10%ysterowania

Rys.9 Graficzna prezentacja odpowiedzi śmigłowca ILX-27 na wymuszenie w kanale pochylenia o wartości $12^{\circ}/s^2$ dla 10%ysterowania

Rys.10 Graficzna prezentacja odpowiedzi śmigłowca ILX-27 na wymuszenie w kanale odchylenia o wartości $9^0/s^2$ dla 10% wystereowania

Wykonywane próby w locie śmigłowca ILX-27 wskazały z jednej strony na trafność większości zaproponowanych rozwiązań, z drugiej zaś ujawniły większe niż spodziewane obciążenie operatora-pilota podczas sterowania. Dodatkowo odbywało się to bez zauważalnego postępu w „opanowywaniu” śmigłowca, mierzonego jako wzrost precyzji zachowania zadanych parametrów lotu w kolejnych próbach. Jako jedną z potencjalnych przyczyn tego stanu podejrzewano opóźnienie w torze sterowania.

Na sumaryczne opóźnienie składają się:

- opóźnienie manipulatora,
- opóźnienie komputera dopasowującego sygnał,
- opóźnienie toru radiomodemowego transmisji bezprzewodowej,
- opóźnienie modułu odbioru, opóźnienie komputera pokładowego,
- opóźnienie modułu sterownika serwomechanizmów,
- opóźnienie wynikające z ograniczonej prędkości serwomechanizmów hydraulicznych.

Dla oceny wpływu opóźnienia w torze sterowania śmigłowcem wykonano kolejne próby wykorzystując specjalnie zaprojektowany i wykonany układ opóźniający dla symulatora PC (rys. 11).

Rys. 11 Manipulator zdalnego sterowania wraz z układem opóźniającym wykorzystanym do eksperymentu symulacyjnego opóźnienia

Specjalnie zaprojektowany układ opóźniający umożliwiał symulację opóźnienia sumarycznego toru sterowania w zakresie wartości od 20 do 600 ms. Wykonane próby pozwoliły sformułować poniższe wnioski:

- opóźnienie w torze sterowania ma istotny wpływ na łatwość i pewność sterowania śmigłowcem w trybie bez stabilizacji, przy czym czynnik opóźnienia jest tym bardziej znaczący im mniej stateczny jest śmigłowiec (czyli im szybszych reakcji wymaga od operatora do zachowania parametrów równowagi)
- dla modelu symulacyjnego śmigłowca o charakterystyce odpowiedzi na sterowanie zbliżonej do śmigłowca ILX-27 stwierdzono, że sumaryczne opóźnienie w torze sterowania o wartości większej niż 300 ms jest już krytycznie duże (praktycznie uniemożliwia utrzymanie zadanych parametrów lotu), zaś opóźnienie o wartości poniżej 100 ms jest mało istotne

i jest stosunkowo łatwe do korekty przez wprawnego i doświadczonego operatora.

- w wyniku porównania reakcji śmigłowca ILX-27 podczas prób w locie z eksperymentem symulacyjnym z wykorzystaniem układu opóźniającego oceniono sumaryczne opóźnienie toru sterowania na 220 do 240 ms.

Z uwagi na wartość sumarycznego opóźnienia bliską szacowanej wartości krytycznej zmodyfikowano tor sterowania poprzez eliminację komputera dopasowującego sygnał dla radiomodemu i rekonfigurację łącza radiomodemowego co pozwoliło na redukcję opóźnienia toru sterowania do szacowanej wartości poniżej 160 ms.

5. Wnioski

W czasie badań i prób w locie stwierdzono:

- Poprawne reakcje sterowania - analiza zapisów rejestracyjnych wskazuje na poprawną i wystarczającą sterowność śmigłowca w analizowanych kanałach sterowania.
- Duża różnica w czułości sterowania - wyznaczone sterowności (a więc czułości sterowania) w poszczególnych kanałach znacząco się różnią co stanowi utrudnienie dla operatora, ale jest łatwe i szybkie do skorygowania programowego.
- Mały zapas skoku ogólnego - loty próbne realizowane w zawisie na wysokości oddziaływania wpływu ziemi wymagały wysterowania skoku ogólnego w zakresie 75 do 80%.
- Mały zapas sterowania śmigłem ogonowym - podczas lotów próbnych zarejestrowano wysterowanie skoku śmigła ogonowego w warunkach równowagi w zawisie bliskie lewym ogranicznikom wysterowania. Dla bezpiecznej kontynuacji badań w locie celowe jest zwiększenie ciągu maksymalnego śmigła ogonowego, co przesunie trymowe wysterowanie bliżej centrum obszaru sterowania kątem odchylenia.
- Opóźnienia w torze sterowania - reakcje śmigłowca ILX-27 na sterowanie w trybie sterowania manualnego z wykorzystaniem bezprzewodowego toru transmisji sygnałów sterowania wskazują na znaczące opóźnienie sumaryczne. Zarejestrowano i zanalizowano źródła opóźnień w układzie sterowania. Oceniono że sumaryczne opóźnienie wynosi szacunkowo 220 do 240 ms (w zestawieniu z wartością krytyczną wynoszącą około 300 ms dla tego typu obiektu).

Prototyp wydaje się dobrą platformą badawczą i w miarę prób i naturalnych modyfikacji rokuje jako przyszłościowy bezzałogowy system zadaniowy

6. Bibliografia

- [1] Hajuk J., Popowski s., Szumański K.: Badanie granic manewrowości śmigłowca na modelu latającym, Prace Instytutu Lotnictwa, 2004.

Dr inż. Ryszard Sabak – ukończył studia w roku 1984 na Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej. Stopień doktora nauk technicznych, specjalność diagnostyka techniczna uzyskał w 2002r. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Specjalizuje się w konstrukcji oraz badaniach bezzałogowych statków powietrznych.

mgr inż. Jarosław Hajduk – absolwent Wydziału Mechaniki Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Pracuje na stanowisku Starszego Specjalisty w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Zajmuje się badaniami, konstrukcją oraz metodami wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych.