

MODELE SYSTEMÓW AUTOMATYCZNEGO STEROWANIA W PROJEKTOWANIU I SZKOLENIU

W referacie zaprezentowano kryteria i zasady modelowania układów automatycznego sterowania w zastosowaniu do zagadnień projektowania oraz symulacji w czasie rzeczywistym. Przedstawiono zasady optymalizacji tych modeli matematycznych w zależności od ich zastosowań. Rozważania przeprowadzono na przykładzie układów automatycznego sterowania lotem samolotu. Omówiono zagadnienia spotykane zarówno w przypadku samolotów wojskowych, w tym bojowych, jak też cywilnych, przede wszystkim komunikacyjnych. Jako aplikacje przykładowe dla projektowania i badań przyjęto: symulator badawczy wykorzystywany do projektowania kokpitu śmigłowca bojowego oraz symulator wykorzystany do opracowania nowego kokpitu samolotu bojowego. Dla modelowania układów, wykorzystywanego w szkoleniu ich użytkowników omówiono jego zastosowania w symulatorach i urządzeniach treningowych.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS MODELS IN DESIGNING AND TRAINING

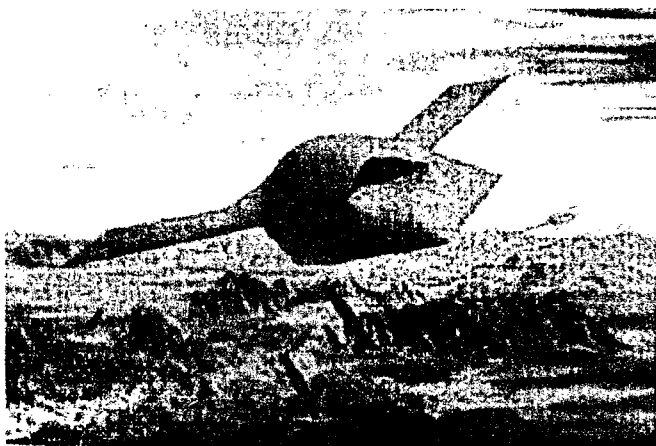
Criteria and principles of automatic control systems modelling in area of designing and real time simulation were presented in the paper. Their optimisation rules depending on their applications were described. Analysis was done on the example of automatic flight control systems. Problems could be found in both military, among them combat, and civil aeroplanes – mainly airliners were analysed. As the example of design and research applications were applied the following research flight simulators: one used for designing of new combat helicopter cockpit and the second – for development of the new fighter aeroplane cockpit. For automatic control systems models in training their applications in simulators and training devices were described.

1. WPROWADZENIE

Burzliwy rozwój współczesnego lotnictwa zarówno pod względem ilości statków powietrznych jak i ich możliwości pociągnął za sobą jeszcze gwałtowniejszy rozwój stosowanych tu systemów automatycznego sterowania.

Wzrastająca ilość uczestników ruchu powietrznego spowodowała konieczność zwiększenia dokładności kontroli obszaru powietrznego i kierowania ruchem w tej przestrzeni. Co za tym idzie należało zwiększyć dokładność układów nawigacyjnych zarówno pokładowych jak i zewnętrznych kontrolujących ruch powietrzny. Współczesne układy nawigacyjne ogólnego stosowania określają pozycję z dokładnością do kilkunastu metrów, zaś ich lotnicze odpowiedniki z dokładnością do 1,5 m. Także wysokość lotu określa się z błędem poniżej 1%.

Wzrost wymagań odnośnie niezawodności i bezpieczeństwa wykonywania lotów spowodował automatyzowanie coraz większej ilości zadań i czynności wykonywanych dotychczas przez człowieka. Co więcej, w lotnictwie wojskowym wymagania odnośnie szybkości i jakości wykonania zadań bojowych na współczesnym polu walki powodują, że człowiek staje się najłabszym elementem w torze sterowania samolotem. W związku z tym można oczekiwać, że w najbliższym czasie napotkamy w powietrzu samoloty bojowe bez pilota, pilotowane, a raczej sterowane, z ziemi. W dalszej perspektywie prawdopodobnie pilotowane i sterowane całkowicie automatycznie, zdolne do działania w pełni autonomicznego (por. Rys.1).



Rys.1. Bezpilotowy Bojowy Statek Latający X-45 [12]

Zwiększone wymagania odnośnie niezawodności oraz konieczność obniżania kosztów eksploatacji spowodowały powiększenie zakresu funkcji sterowniczych realizowanych przez układy automatyczne. Stopniowo rozszerzano zakres funkcji i zastosowań układów automatycznego sterowania

Początkowo były to układy stabilizujące kurs, wysokość i prędkość lotu. Później wprowadzono układy automatycznie wyprowadzające samolot na zadany kurs, wysokość i

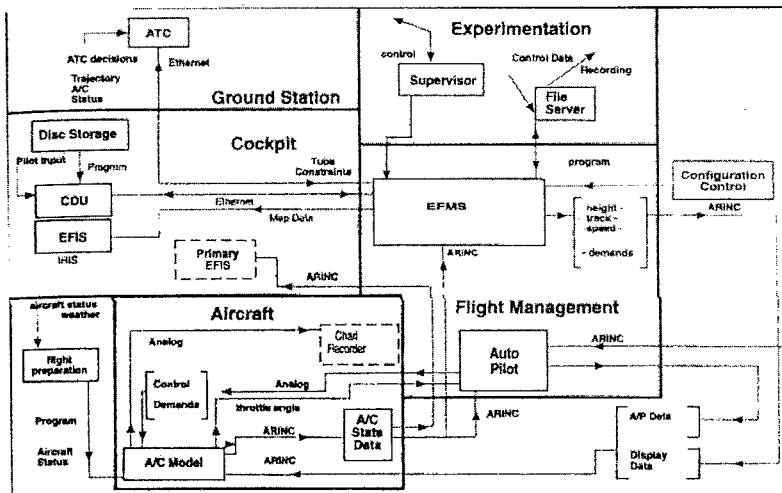
prędkość. Musiały one mieć podstawowe informacje nawigacyjne o bieżącym stanie sterowanego obiektu. Ta potrzeba powodowała integrowanie ich z układami nawigacyjnymi samolotów i śmigłowców. W tych czasach osobne układy stabilizowały automatycznie ciąg zespołu napędowego dla wartości parametrów zadanych przez pilota.

Wzrost manewrowości nowo projektowanych samolotów bojowych zmniejszał ich stateczność. Układy aerodynamiczne tych samolotów zmniejszały niebezpiecznie zakres lotu możliwy do wysterowania przez pilota. W celu zapobieżenia tej niekorzystnej tendencji zaczęto wprowadzać układy poszerzające zakres stabilności samolotu (tak zwane układy SAS – Stability Augmentation Systems), współpracujące z pilotem podczas wykonywania całego lotu.

Rozwijanie systemów bojowych, poprzez wprowadzanie nowych wersji i rodzajów uzbrojenia oraz nowych zastosowań bojowych, pociągnęło za sobą konieczność zautomatyzowania wielu czynności, jakie dotychczas wykonywał pilot lub operator uzbrojenia. Rosnący stopień komplikacji zadań bojowych spowodował, że w czasie wykonywania zadania przechwycenia celu i odpalenia uzbrojenia, pilot praktycznie nie był w stanie zajmować się pilotowaniem samolotu; ten zakres czynności wykonywał niemal „odруchowo”. Naturalnym więc było próbowanie odciążenia go od typowych zadań pilotażowych i powierzenie ich układowi automatycznego sterowania.

Tendencje te doprowadziły do sytuacji, gdy prawie każdy z systemów pokładowych w poszczególnych fazach lotu całkowicie lub w znacznym zakresie był sterowany przez układy automatyczne. Zaczął pojawiać się problem synchronizacji i poprawności współdziałania tych układów. Konsekwencją tego stanu rzeczy było wprowadzenie układu automatycznego sterującego innymi układami automatycznego sterowania. Takie układy nadrzędne noszą nazwę Układów Zarządzania Lotem (FMS - Flight Management Systems). Pełnią one funkcję nadrzędnego integratora układów automatycznego sterowania lotem. Układy te mają wpisane zadania jakie ma zrealizować podczas lotu samolot lub śmigłowiec, np. dolecieć do określonego celu lub wykonać bombardowanie określonego celu w zdefiniowany sposób. Przykładową strukturę takiego hierarchicznego układu sterowania lotem samolotu wraz ze środowiskiem w jakim funkcjonuje przedstawiono na Rys.2.

Funkcje człowieka w takich systemach sprowadzają się do sterowania zadaniem najważniejszym w danej chwili lub wybierania odpowiednich trybów lub parametrów pracy układu automatycznego zarządzania lotem. Pilot jednak zawsze ma możliwość bezpośredniego sterowania dowolnymi funkcjami i układami w przypadkach nieprzewidzianych zagrożeń lub zaburzeń wytrącających sterowany obiekt poza dopuszczalny zakres lotu (skutek działania atmosfery lub innych uczestników ruchu powietrznego). W takich przypadkach sterowanie poszczególnymi czynnościami ma postać półautomatyczną lub ręczną. Jednak w obu przypadkach układy sterowania powinny być tak zaprojektowane, by umożliwić człowiekowi wykonanie postawionego zadania.



Rys.2. Eksperymentalny system zarządzania lotem (FMS) samolotu wraz z jego otoczeniem [1]

2. KRYTERIA TWORZENIA MODELI ORAZ ICH WŁAŚCIWOŚCI

Na podstawie analizy przedstawionej we Wprowadzeniu możemy określić dwa podstawowe obszary zastosowań modeli matematycznych układów automatycznego sterowania związane z:

- ich projektowaniem,
- szkoleniem ich użytkowników.

Te dwie grupy zastosowań wymagają od modeli matematycznych różnych, często przeciwstawnych właściwości. Tak rozległy zakres cech powoduje, że możemy powiedzieć, iż pokrywają one praktycznie cały obszar aplikacji modeli matematycznych układów automatycznego sterowania. Analiza kryteriów jakim powinny odpowiadać te modele pozwoli na sformułowanie ogólnych zasad dotyczących budowy modeli układów automatycznego sterowania - UAS.

Oczywistym i podstawowym kryterium poprawności każdego modelu matematycznego, nie tylko UAS, jest jego przydatność dla celu w jakim go stworzono. Innym podstawowym, choć często zapomnianym kryterium jest prostota modelu. Ten postulat ma na celu umożliwienie przeprowadzenia analizy poprawności stworzonego modelu w zakresie wiedzy jaką dysponujemy oraz dostępnych informacji, pozwalających na prawidłową weryfikację modelu. Stosując zasadę „brzytwy Ockhama” można by ten postulat przedstawić w następującej postaci: model powinien być najprostszymi z możliwych, jaki umożliwia prawidłowe odwzorowanie interesujących nas cech układu automatycznego sterowania oraz jego weryfikację. Przykłady proponowanego podejścia do formułowania takich modeli przedstawione zostaną w dalszej części referatu.

2.1. Modele do projektowania układów automatycznego sterowania

Modele matematyczne przeznaczone do projektowania lub badania układów automatycznego sterowania powinny mieć następujące właściwości:

1. Wiernie odwzorowywać modelowane cechy układu;
2. Być możliwie szczegółowe;
3. Uwzględniać bieżący stan wiedzy i prowadzone badania;
4. Powinny być podatne na zmiany całej struktury modelu;
5. Mieć strukturę umożliwiającą łatwe modyfikowanie elementów modelu;
6. Nie muszą być wyliczane w czasie rzeczywistym. Wyjątkiem będą tu badania prowadzone z udziałem ludzi, np. mające na celu optymalizację struktury układu sterowania pod kątem jego możliwej współpracy z człowiekiem-operatorem.

2.2. Modele do szkolenia użytkowników układów automatycznego sterowania

Modele matematyczne przeznaczone do tego obszaru zastosowań powinny mieć następujące właściwości:

1. Muszą być wyliczane w czasie rzeczywistym, lub krótszym;
2. Mogą w ograniczonym stopniu uwzględniać bieżący stan wiedzy;
3. Muszą odwzorowywać jedynie te cechy modelowanych układów, które są przedmiotem szkolenia;
4. Najczęściej modeluje się zewnętrzne efekty ich działania, możliwe do zaobserwowania przez człowieka;
5. Mogą mieć postać dostosowaną specjalnie do komputerów, na których będą implementowane;
6. Nie muszą być podatne na wprowadzanie zmian ani w ich strukturze, ani w postaci ich elementów;
7. Muszą być niezawodne obliczeniowo.

3. MODELE BADAWCZE W PROJEKTOWANIU SYSTEMÓW STEROWANIA SAMOŁOTEM

Jako przykładowe zastosowania modeli matematycznych układów automatycznego sterowania do projektowania tych układów przyjęto:

- symulator do projektowania systemu sterowania nowego śmigłowca bojowego (por. Rys.3),
- symulator badawczy zastosowany do projektowania nowego kokpitu samolotu bojowego (por. Rys.4).

3.1. Projekt systemu sterowania nowego śmigłowca

Przedstawiony na Rysunku 3 symulator badawczy zbudowany został specjalnie do zaprojektowania systemów sterowania nowym śmigłowcem bojowym. Jego załogę stanowią pilot i operator systemów uzbrojenia. Jak widać to na rysunku, symulator ten nie odwzorowuje architektury kokpitów projektowanego śmigłowca, a jedynie jakościowo oddaje położenie elementów systemów sterowania śmigłowcem w każdej z kabin. Także wzajemne usytuowanie obu członków załogi nie w pełni odpowiada rzeczywistości. Nie ma to jednak

większego znaczenia, gdyż załogi prowadzące badania z wykorzystaniem tego symulatora nie szkodzą się do jego obsługi, a sprawdzają skuteczność i funkcjonalność jego systemów sterowania. W czasie badań dokonywano wielu zmian w układzie elementów sterujących i wskaźnikowych oraz w rodzajach i sposobach przedstawiania załozce potrzebnych w danej chwili informacji. Stąd też kabiny mają postać szkieletu, na którym stosunkowo łatwo jest dokonywać potrzebnych wymian zamontowanego wyposażenia. Ponadto zastosowano standardowe łącza do transmisji danych, jednak ilość kanałów transmisji znacznie przewyższała niezbędne minimum. Umożliwiło to bezproblemowe modyfikacje typów montowanego wyposażenia oraz dokładną kontrolę przesyłanych sygnałów.



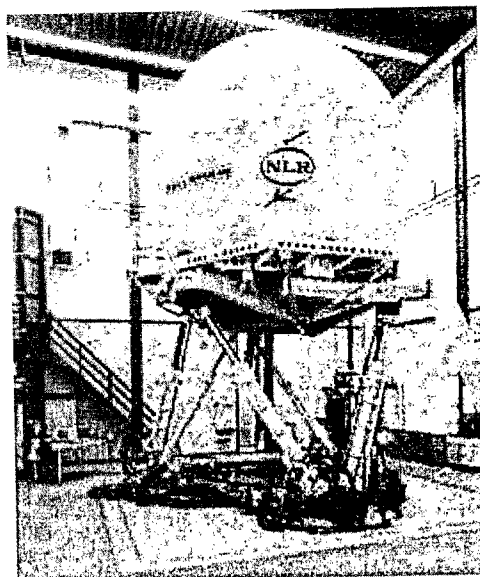
Rys.3. Symulator badawczy do projektowania nowego śmigłowca bojowego [8]

Modele matematyczne systemów automatycznego sterowania opisywały dynamikę projektowanych układów z dokładnością do opisu modułów bądź elementów, jakie mogły być wymieniane podczas tej fazy projektu. Łącząc odpowiednie moduły uzyskiwano opis funkcjonowania projektowanych systemów w stanach normalnych i przewidywanych

awariach. Równania opisujące dynamikę tych układów pozwoliły także na ocenę możliwości współpracy tych układów z załogą śmigłowca.

3.2. Projekt nowego kokpitu samolotu bojowego

Przedmiotem projektu było nowe wyposażenie kokpitu samolotu F-16 E/F. Prace te prowadzone były na symulatorze badawczym NLR, na którym zabudowano nowo projektowany kokpit, wykorzystując pozostałe istniejące moduły tego symulatora: system ruchu, wizualizacji, stanowisko badaczy-operatorów, system komputerowy (por. Rys.4). Zakres badań w tym przypadku był węższy niż w omawianym poprzednio, gdyż nie projektowano tu nowych systemów z dokładnością do ich elementów, a jedynie sprawdzano możliwość współpracy już wstępnie zweryfikowanych wersji projektów układów sterowania z pilotami. Także zakres zadań bojowych, których wykonanie badano na tym symulatorze był ograniczony do podstawowych zadań przewidywanych dla tego typu samolotu.



Rys.4. Symulator badawczy NLR wykorzystany do opracowania nowego kokpitu samolotu F-16 MLU [9,11]

Stosowane podczas tych badań modele matematyczne układów automatycznego sterowania opisywały więc raczej struktury systemów i ich podukładów pod kątem ich prawidłowego działania, a przede wszystkim możliwej i optymalnej współpracy z pilotem. Badano tu rodzaje i sposoby przedstawiania informacji pilotowi w zależności od fazy lotu, wykonywanego zadania oraz warunków wykonywania lotu. Modele matematyczne opisywały więc przepływ strumieni informacji oraz dynamikę tego przepływu, a w zasadzie sekwencje czasowe przesyłania informacji. W przypadku tego projektu znany był jeszcze jeden, bardzo istotny element systemu sterowania, a mianowicie obiekt sterowania – samolot F-16. W przypadku poprzednim badania obejmowały także weryfikację właściwości dynamicznych

nowo projektowanego śmigłowca. Dlatego też model matematyczny obiektu sterowania był w przypadku modernizacji kokpitu elementem zadany, niezmiennym. W badaniach opisanych w poprzednim punkcie, gdy okazywało się, że nie jest możliwe poprawne sterowanie śmigłowcem bez względu na stosowane układy sterowania, zmiany wprowadzano do projektu samego obiektu sterowania.

4. SYMULATORY SZKOLENIOWE

Ze względu na ograniczoną objętość referatu oraz większą dostępność, a przez to znajomość zagadnień związanych z symulatorami szkoleniowymi, ograniczono się jedynie do skrótego przedstawienia wniosków dotyczących tego zakresu zastosowań modeli systemów automatycznego sterowania. Wnioski i komentarze oparte będą o doświadczenia własne zdobyte podczas prac nad budową kilku prototypów symulatorów szkoleniowych [2,3,4,5,6,7] oraz przykłady innych aplikacji tego typu [10].

Poniżej omówione zostaną właściwości modeli matematycznych układów automatycznego sterowania stosowanych do szkolenia ich użytkowników, głównie w symulatorach szkoleniowych, przedstawione w rozdziale 2.2. niniejszego referatu

1. *Wylizanie w czasie rzeczywistym lub krótszym.* Komentarza wymaga jedynie określenie obliczeń modelu w czasie krótszym niż rzeczywisty. Otóż modele te są podstawą do wysterowania odpowiednich wskaźników w kabinie symulatora. Wskaźniki te muszą mieć dynamikę taką jak ich rzeczywiste odpowiedniki. Wylizane w modelu informacje trzeba jednak przetworzyć do postaci sygnałów sterujących poszczególnymi imitatorami w kabinie symulatora oraz przesłać je pod odpowiedni adres. Przetwarzanie sygnałów oraz ich transmisja muszą zmieścić się w ramach określonych przez wymaganie czasu rzeczywistego, stąd same obliczenia modelu matematycznego muszą być wykonane w czasie krótszym niż rzeczywisty.
2. *Mogą w ograniczonym stopniu uwzględnić istniejący stan wiedzy.* Komentarz ten będzie wspólny także dla następnego punktu. Otóż z punktu widzenia szkolenia operatora systemu sterowania istotne są jedynie zewnętrzne objawy działania tego systemu, jakie może on odebrać swoimi zmysłami. Stąd też modele tych systemów powinny być możliwie proste (patrz postulat 1) i opisywać tylko te zewnętrzne objawy ich działania. Stąd też spotykamy tu modele algebraiczne ze złożoną strukturą logiczną opisujące niekiedy skomplikowane systemy, a w zasadzie podstawowe ich funkcje wraz z zachowaniem sekwencji czasowych ich działania.
3. *Muszą odwzorowywać jedynie te cechy modelowanych układów, które są przedmiotem szkolenia.* Z punktu widzenia urządzenia przeznaczonego do szkolenia użytkowników systemu automatycznego sterowania istotne jest opanowanie obsługi tego urządzenia w warunkach normalnych i awaryjnych. Wszelkie inne cechy można traktować co najwyżej jako mniej lub bardziej przydatne gadżety.
4. *Najczęściej modeluje się zewnętrzne efekty ich działania, możliwe do zaobserwowania przez człowieka.* Z punktu widzenia operatora-użytkownika systemu automatycznego sterowania, system ten działa jeżeli można zaobserwować skutki jego pracy. Takim skutkiem będzie przede wszystkim zachowanie się obiektu sterowania, ale także urządzenia sygnalizacyjne samego

systemu sterowania informujące o jego stanie lub realizowanej funkcji. Dlatego też należy symulować zmiany w sterowanym obiekcie oraz zmiany stanu urządzeń sygnalizacyjnych systemu sterowania.

5. *Mogą mieć postać dostosowaną specjalnie do komputerów, na których będą implementowane.* Kryterium to wynika bezpośrednio z wymagania obliczeń modelu w czasie rzeczywistym. Często opłacalne jest dostosowanie struktury oprogramowania modelującego system sterowania do właściwości komputera realizującego te obliczenia, by obniżyć koszt realizacji urządzenia stosując tańszy sprzęt do jego realizacji.
6. *Nie muszą być podatne na wprowadzanie zmian ani w ich strukturze, ani w postaci ich elementów.* Modele stosowane do szkolenia mają z góry określony zakres zastosowań i nie będą wykorzystywane w innym zakresie. Jeżeli po pewnym okresie użytkowania ich w urządzeniach treningowych następuje ich zamiana wynikająca ze zmiany samego systemu sterowania, wówczas wymienia się na ogół całe urządzenia treningowe i buduje się dla nowego systemu nowoczesne, spełniające bieżące wymagania a także oczekiwania użytkownika.
7. *Muszą być niezawodne obliczeniowo.* Użytkownik urządzenia treningowego nie będzie zadowolony z „zawieszania się” systemu komputerowego spowodowanego błędami modelu matematycznego. Usuwanie tych usterek jest uciążliwe zarówno dla użytkownika jak i niewskazane dla opinii producenta takiego urządzenia treningowego.

5. POSUMOWANIE

Przedstawione przykłady i analiza właściwości modeli matematycznych systemów sterowania stosowanych do badań i projektowania oraz szkolenia użytkowników tych systemów, pozwalają sformułować szereg wniosków.

1. Opisane kryteria budowy modeli systemów automatycznego sterowania pozwalają zbudować model dla dowolnego zakresu aplikacji.
2. Modele badawcze systemów automatycznego sterowania stają się obecnie standardowym narzędziem ich projektowania i integracji z obiektem sterowania. Stosowane techniki symulacyjne stanowią podstawowe narzędzie konstruktorów i badaczy w tej dziedzinie.
3. Częstkowe modele opisujące wybrane aspekty funkcjonowania systemów automatycznego sterowania znajdują szerokie zastosowanie zarówno do szkolenia użytkowników tych systemów jak i prac konstrukcyjnych czy badawczych. Są nadzwyczaj efektywne ze względu na niewielki „koszt” ich sformułowania, weryfikacji i obliczeń.
4. W referacie nie poruszono aspektu numerycznej realizacji sformułowanych modeli. Jest to temat zasługujący na osobne opracowanie, jednak nie mieścił się w ramach wyznaczonych na ten referat. Formułując jednak modele matematyczne systemów automatycznego sterowania należy ten aspekt brać także pod uwagę.

5. LITERATURA

- [1] S.Coyle: *European ATC Experiments*. In: Avionics, September 1993, pp. 44-49.

- [2] J.Gajda, C.Szczepański: *Symulacja systemu sterowania statek powietrzny – autopilot – nawigator naziemny*. II Krajowa Konferencja „Automatyzacja Nawigacji i Systemów Sterowania”, Gdynia 1989.
- [3] C.Szczepański: *Model symulacyjny specjalizowanego autopilota sterującego ruchem przestrzennym samolotu podczas walki powietrznej*. II Krajowa Konferencja „Automatyzacja Nawigacji i Systemów Sterowania”, Gdynia 1989.
- [4] C.Szczepański: *Metoda analizy i syntezy układu automatycznego sterowania lotem samolotu*. IV Ogólnopolska Konferencja „Mechanika w Lotnictwie”, Warszawa 1990, Mechanika Teoretyczna i Stosowana, s. 480-487.
- [5] C.Szczepański, J.Gajda: *Simulators Of Integrated Navigation Systems During The Training Of Pilots*. IV Krajowa Konferencja „Automatyzacja Nawigacji i Systemów Sterowania”, Gdynia 1993.
- [6] Z.Paturski, C.Szczepański: *Low-Cost Flight Simulator Computer System*. International Training and Equipment Conference, ITEC'96 Proceedings, Haga 1996, s.440-444.
- [7] C.Szczepański, C.Świrta: *System transmisji danych symulatora*. AUTOMATION'98 Konferencja Naukowo-Techniczna, Warszawa 1998, s.380-387.
- [8] C.Szczepański: *Symulatory lotu śmigłowców*. Prace Instytutu Lotnictwa, nr 153-154, Warszawa, s. 37-43.
- [9] NLR: Strona internetowa: www.nlr.nl/public/facilities/fl64-01/.
- [10] J.J.Burger: *Effective Training Of Maintenance Technicians By Integrating Simulation And Original Hardware*. International Training and Equipment Conference, ITEC'95 Proceedings, Haga 1995.
- [11] H.A.J.M.Offerman: *Full Mission Simulator For Research And Development*. International Training and Equipment Conference, ITEC'95 Proceedings, Haga 1995, s.377-387.
- [12] *Aero News Network 9-10.11.2001*; wydanie Internetowe: <http://www.aero-news.net>