

Jacek PIENIAŻEK

SYSTEM STEROWANIA SAMOLOTEM Z ZASTOSOWANIEM MAGISTRALI CAN

Streszczenie: Sterowanie samolotem wymaga wielu informacji, które we współczesnych systemach mają postać cyfrową. W ramach prowadzonych prac badawczych nad system pośredniego sterowania, realizowanym w Katedrze Awioniki i Sterowania PRz, poszukiwane są nowe rozwiązania dla lotnictwa. Jednym z tych rozwiązań jest koncepcja zastosowania magistrali CAN do przesyłania informacji pomiędzy urządzeniami pomiarowymi, sterującymi i prezentującymi informacje dla pilota. W artykule zostały zaprezentowane wybrane aspekty rozwiązania lotniczego systemu sterowania z zastosowaniem magistrali CAN.

1. WPROWADZENIE

Sterowanie ruchem samolotu podczas lotu wymaga pomiaru wielu wartości zmiennych, które są zarówno prezentowane na różnych wskaźnikach dla pilota, jak i wykorzystywane przez układy sterujące. Ograniczenia zdolności percepcyjnych człowieka powodują konieczność zastosowania odpowiedniego sposobu prezentacji, którego istotą jest ograniczenie strumienia informacji przy jednoczesnym zwiększaniu czytelności informacji istotnych w danym stanie lotu samolotu. Poza rozwiązaniami w zakresie prezentacji informacji ułatwienia sterowania samolotem osiąga się poprzez stosowanie systemów sterowania wspomaganego, czyli układów półautomatycznych, w których sygnały sterujące pilota są sygnałami zadanymi automatu. Dotychczas układy sterowania automatycznego oraz układy sterowania odległościowego ze wspomaganie były wykorzystywane w lotnictwie transportowym i wojskowym. Także w tych obszarach wprowadzono nowe sposoby prezentacji sytuacji pilotażowej i nawigacyjnej (jak zintegrowany wskaźnik sytuacji pilotażowej FSI, wskaźnik nawigacyjny HSI czy wskaźnik przezierny). Istotnym elementem tych systemów są linie transmisyjne, którymi odbywa się przekazywanie informacji pomiędzy układami pomiarowymi, wskaźnikami i układami sterującymi. Stosowane są tu od wielu lat standardy magistral szeregowych jak ARINC 429 i 629, MIL 1553, ASCB [6].

Postęp technologii oraz rosnące zainteresowanie samolotami małymi (klasa samolotów lekkich o masie startowej do ok. 5600 kg) spowodowały, że rozpoczęto prace nad nowymi rozwiązaniami samolotów, a w szczególności nad nowymi systemami wskazań oraz rozwiązaniami systemu sterowania samolotem wspomagającymi pilota poprzez automatyczne wykonywanie czynności żmudnych i wyeliminowanie, występującej w klasycznym sterowaniu, konieczności skomplikowanego wiązania orientacji i położenia samolotu z reakcjami na wychylenie płaszczyzn sterowych. Modernizacja wyposażenia samolotów małych, poprzez wprowadzenie układów sterujących pozwalających w niektórych fazach lotu na w pełni automatyczne sterowanie, a podczas całego lotu wspomaganie pilota, pozwoli na realizację samolotów łatwych w pilotażu. Taki środek komunikacyjny stanie się dostępny szerszemu gronu użytkowników, a nie jak w tej chwili jedynie specjalistycznie przeszkolonej grupie. Ze względu na inną klasę rozwiązań technicznych i różną grupę cenową nie jest możliwe bezpośrednie przeniesienie stosowanych w dużych samolotach urządzeń, standardów a nawet wielu stosowanych tam koncepcji. Systemy wspomagające sterowanie dla małych samolotów wymagają zastosowania innych technologii, które pozwolą na

obniżenie kosztów systemów awioniki-przy zapewnieniu wysokiej niezawodności i wprowadzą nowe cechy funkcjonalne.

W Katedrze Awioniki i Sterowania Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prowadzone są prace nad systemem sterowania pośredniego, który w zamierzeniach ma ułatwić pilotaż samolotu [5]. W uproszczeniu problem polega na tym, aby określić sposób zadawania przez pilota sygnałów sterujących i zapewnić takie sterowanie samolotem, aby samolot przemieszczał się w sposób zadany przez pilota. Równocześnie konieczne jest dostarczenie dla pilota niezbędnych do pilotażu informacji o stanie samolotu. We wczesnym etapie projektowania pojawił się problem wyboru magistrali, którą odbywałaby się transmisja danych pomiędzy układami wchodzącymi w skład systemu. Na podstawie informacji o wysokiej niezawodności i dostatecznej dla tej aplikacji przepustowości, wybrana została magistrala CAN. Nie jest to jedyne lotnicze zastosowanie, gdyż w ramach projektu AGATE [2] prowadzone były prace nad lotniczym zastosowaniem interfejsu CAN.

2. KONCEPCJA MAGISTRALI DANYCH

Cyfrowa magistrala danych dla projektowanego systemu musi zapewnić możliwość przesyłania danych z urządzeń pomiarowych (podstawowymi są układy: odniesienia - mierzący kąty i prędkości kątowe, centrala aerometryczna - mierząca wysokość i prędkości lotu, nawigacyjny - określający położenie samolotu względem Ziemi) oraz sygnałów zadanych przez pilota za pomocą odpowiednich przełączników, nastawników i dźwigni sterujących. Wszystkie te informacje odbiera komputer sterujący i na podstawie tych informacji steruje płaszczyznami sterowymi oraz silnikiem. Magistrala powinna dodatkowo zapewnić możliwość przesyłania informacji sterujących poszczególnymi urządzeniami, co wynika ze specyfiki pomiarów na obiekcie poruszającym się oraz konieczności diagnozowania systemu podczas pracy.

Magistralę CAN wybrano uwzględniając niski koszt i dużą dostępność elementów przy wysokiej niezawodności. W rozwiązaniu wykorzystano standardy CAN [1] dla warstwy drugiej interfejsu (ISO Data Link Layer) oraz ISO11898 dla warstwy fizycznej (Physical Layer). Ze względu na specyfikę zastosowania nie wykorzystano istniejących standardów definiujących szczegółowiej protokoły i identyfikatory (jak CANOPEN, DeviceNet, SDS). Standardy te są masowo wykorzystywane w takich dziedzinach, jak automatyka, pomiary i aplikacje przemysłowe i dla tych zastosowań istnieje wiele gotowych wyrobów, gdy tymczasem zastosowanie w lotnictwie jest na etapie badawczym i tu nie istnieją urządzenia, które bezpośrednio wykonują niezbędne dla systemu sterowania samolotem funkcje. Mimo istnienia tych standardów tworzenie własnych protokołów można zaobserwować w innych dziedzinach, jak np. w systemie PSW/WWT-CAN [3].

Projektowany system zawiera urządzenia, nad którymi prace trwają w KAiS od wielu lat. Dla celów niniejszej aplikacji urządzenia te zostały wykonane w wersjach z interfejsem CAN. Ponieważ system sterowania na obecnym etapie prototypu jest systemem zamkniętym, w którym wszystkie elementy wykonywane są w ramach jednego projektu, opracowane zostały własne protokoły, zasady współpracy urządzeń oraz transmisji pozwalające na uzyskanie wysokiej przepustowości danych oraz możliwość monitorowania pracy systemu.

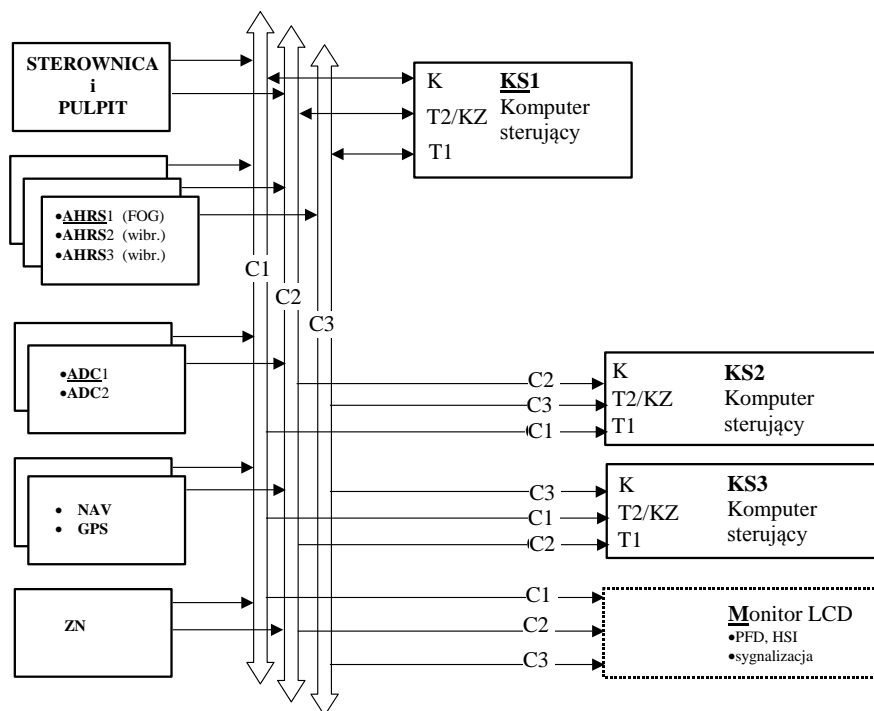
Po rozważeniu różnych koncepcji konfiguracji magistrali, wybrana została koncepcja przydziału każdemu z urządzeń określonej puli identyfikatorów, które to rozwiązanie znakomicie porządkuje zarządzanie projektem. Na obecnym etapie są to jedynie identyfikatory 11-bitowe, ale wszystkie rozwiązania sprzętowe są realizowane w taki sposób, aby istniała możliwość przejścia na identyfikatory 29-bitowe (CAN2.0B). W chwili obecnej

na podstawie analizy ilości informacji, jaka może pojawić się na magistrali - stosowanie długich identyfikatorów nie wydawało się uzasadnione.

Magistrala realizowana jest w dwu wersjach:

- pojedynczej linii transmisyjnej – na etapie wstępnym,
- trzech linii transmisyjnych.

Drugie rozwiązanie, którego schemat przedstawiono na rys.1, jest docelową konfiguracją systemu i struktura ta wynika z konieczności zapewnienia poprawności pracy systemu sterującego samolotem, także przy występujących uszkodzeniach i awariach. Wymagania stawiane układom stosowanym w lotnictwie są szczególnie wysokie w zakresie niezawodności. Wysoka niezawodność stanowi podstawowy warunek możliwości praktycznego zastosowania. W przypadku systemu, który bierze bezpośredni udział w sterowaniu samolotem, błędne działanie może doprowadzić do katastrofy. Z tego powodu konieczne jest zwielokrotnienie krytycznych dla bezpieczeństwa lotu urządzeń i układów wchodzących w skład systemu. Aby efekt zwielokrotnienia urządzeń był skuteczny, konieczne jest równoczesne zwielokrotnienie linii magistral tak, aby wyeliminować możliwość doprowadzenia do katastrofy przez pojedynczą awarię (błędne działanie urządzenia, uszkodzenie interfejsu komunikacyjnego, przerwanie ciągłości linii komunikacyjnej czy zablokowanie linii komunikacyjnej przez błędnie działające urządzenie).



Rys.1. Struktura magistrali systemu

Urządzenia wchodzące w skład systemu, czyli pulpit, dźwignie sterujące, komputery sterujące oraz układy pomiarowe, komunikują się za pomocą magistrali CAN. Informacje przesyłane magistralą są to wyniki pomiarów, sygnały sterujące pracą urządzeń, komunikaty organizujące pracę magistrali. Większość informacji stanowią informacje o stanie samolotu dostarczane przez układy pomiarowe. Każda dana jest wynikiem pomiaru jednej bądź wielu wielkości fizycznych i odpowiednich operacji na tych wielkościach. W cyfrowym układzie sterowania konieczne jest zapewnienie równomierności czasowej napływu wyników pomiaru każdej z wielkości. Wartości różnych wielkości fizycznych powinny być wysyłane z różnym okresem zależnym od tego, jaka jest zmienność danej wielkości. Przykładowo sygnałami szybkozmiennymi są prędkości kątowne a sygnałami wolnozmiennymi położenie samolotu

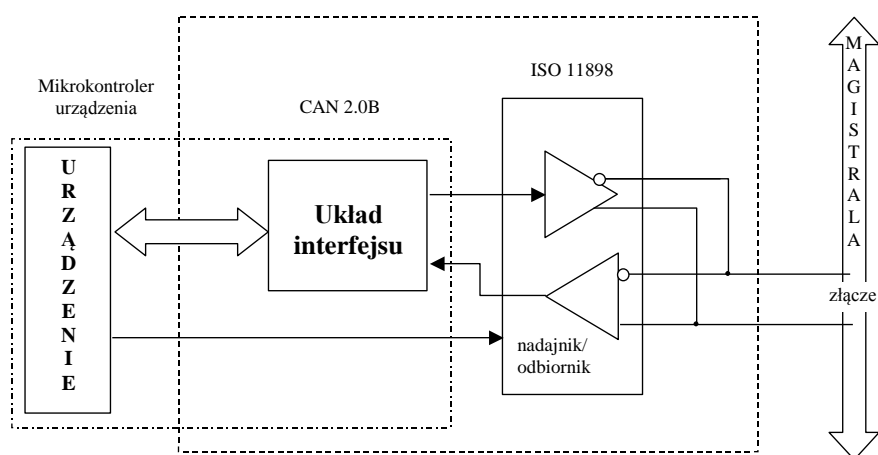
względem Ziemi. Uwzględniając tę właściwość dla każdej grupy danych (związanej z jednym urządzeniem pomiarowym) zostały określone częstotliwości repetycji poszczególnych sygnałów a w efekcie określono częstotliwości, z jakimi poszczególne urządzenia mają wysyłać informacje na magistralę. W czasie normalnej pracy (tj. bez wystąpienia uszkodzeń, gdy sterowanie odbywa się w sposób nie prowadzący do stanów niebezpiecznych) urządzenia pomiarowe nadają swoje komunikaty z założonym okresem repetycji a wszystkie urządzenia, które potrzebują danej informacji odbierają odpowiednie komunikaty. Nie jest to jednak jedyny tryb pracy magistrali. Przewidując możliwość wystąpienia awarii urządzeń oraz konieczność inicjowania niektórych z nich, przypisano komputerom sterującym funkcje kontrolera magistrali. Funkcja ta pozwala na sterowanie pracą urządzeń na magistrali w ramach przewidywanych funkcji, którymi są przykładowo: nakazanie wykonania testu wewnętrznego, wprowadzenie założonych parametrów inicjujących i roboczych, nakazanie wyłączenia funkcji nadawania wyników pomiaru oraz wymuszenie odesłania określonego komunikatu.

Istotnym zagadnieniem jest przydział identyfikatorów. Ponieważ w standardzie CAN identyfikator określa priorytet komunikatu, więc dla projektowanego systemu, przydzielony identyfikator określa możliwość opóźnienia (w sensie wartości i prawdopodobieństwa, że opóźnienie wystąpi), jakim informacja pojawi się na magistrali. Oczywiście jest, że najwyższy priorytet otrzymały komunikaty kontrolera. Kolejne w hierarchii są informacje bezpośrednio wpływające na bezpieczeństwo wykonywania lotu. Informacje wolnozmiennie, nie mające zasadniczego wpływu na bezpieczeństwo (a często dostępne z małą częstotliwością, jak np. położenie z odbiornika systemu GPS), otrzymały najniższe priorytety.

W projekcie przyjęto maksymalną prędkość transmisji, czyli 1Mbit/s. Przy szacowaniu obciążenia magistrali określono strumień danych na poziomie $k_1 = 19\ 500$ do $29\ 000$ bit/s w zależności od zastosowanego formatu. Przyjmując średnie wypełnienie komunikatów informacjami użytecznymi na poziomie 5 bajtów, odpowiada to średniemu obciążeniu magistrali na poziomie $k_2 = 47$ do 70 kbit/s. Przy szacowaniu średniego obciążenia wzięto pod uwagę fakt wprowadzania przez magistralę dodatkowych bitów (stuff bits) poza bitami organizacyjnymi komunikatu. Przedstawione wyniki dotyczą najbardziej obciążonej magistrali C1, pozostałe magistrale są obciążone w mniejszym stopniu.

Uzyskany duży zapas przepustowości pozwala na przeprowadzanie eksperymentów z pojedynczą linią magistrali w fazie początkowych badań i dostrajania systemu, co stanowi istotną zaletę.

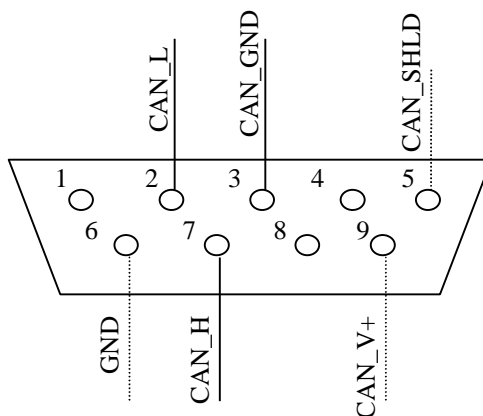
Każde urządzenie podłączone do magistrali (rys.2) zawiera: układ interfejsu CAN2.0B, układ nadajnika-odbiornika standardu ISO 11898 (np. PCA82C250) oraz złącze standaryzowane w ramach projektu. Zastosowanie jednego typu złącza pozwala na wymieniałość urządzeń na linii magistrali.



Rys.2. Podstawowa struktura urządzenia na magistrali

Standardowe złącze przedstawiono na rys.3. Określając konfigurację złącza wzorowano się na standardzie CANopen co pozwala na dołączenie do magistrali komputerów wyposażonych w odpowiednie karty interfejsu.

Poza liniami transmisyjnymi CAN_L i CAN_H oraz linii CAN_GND wykorzystywanej do sprowadzenia potencjałów nadajników do jednego poziomu, przewidziano możliwość wykorzystania linii ekranu CAN_SHLD. Linie GND i CAN_V+ przewidziano do zasilania tych urządzeń systemu, których pobór prądu nie przekracza 1A.



Rys.3. Konfiguracja złącza magistrali

Jak już wspomniano podstawowym trybem pracy jest synchroniczna transmisja komunikatów. Ten tryb pracy oznacza, że każde urządzenie wysyła każdy komunikat w określonej dla tego komunikatu chwili czasowej, z odpowiednią częstotliwością.

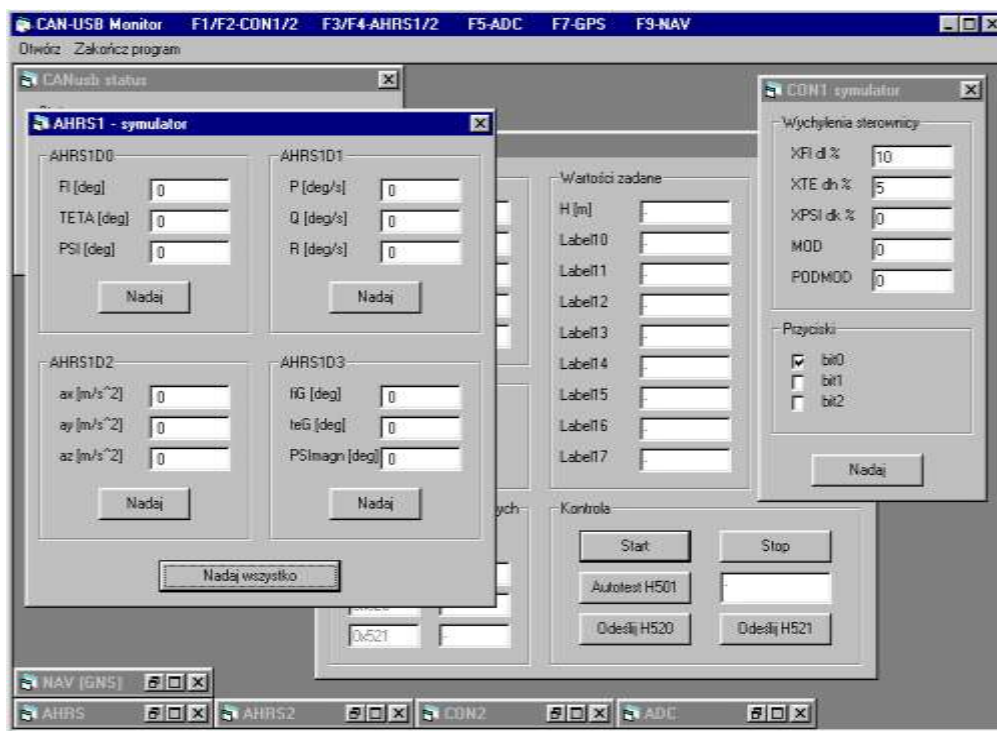
Jedno urządzenie na magistrali ma specjalny status – kontrolera. Urządzeniem tym jest zwykle komputer sterujący. Jedynie na etapie uruchamiania przewiduje się, że dołączony z zewnątrz komputer typu PC będzie mógł pełnić funkcję kontrolera. Kontroler magistrali jest jedynym urządzeniem mogącym ingerować programowo w stan magistrali. Kontroler magistrali może odłączyć (wysyłając komunikat) każde z urządzeń, gdy stwierdzi jego niepoprawne działanie. Oczywiście nie jest to rozwiązanie skuteczne dla wszelkich uszkodzeń uniemożliwiających poprawną pracę magistrali. W przypadku braku reakcji uszkodzonego urządzenia oraz przy uszkodzeniu linii należy przełączyć się na wykorzystanie pozostałych dwu magistral.

Wykonanie i integracja magistrali wymaga zastosowania monitora stanu magistrali oraz urządzenia, które pozwoli na ręczne i programowe sterowanie magistralą. Urządzeniem takim jest komputer przenośny wyposażony w kartę interfejsu oraz oprogramowanie dedykowane do tych zadań. Urządzenie to jest przydatne zarówno w laboratorium, jak i w samolocie podczas integracji i strojenia systemu.

Wymagane funkcje monitora są następujące:

1. obrazowanie wszystkich sygnałów na magistrali z podziałem na grupy według urządzeń,
2. funkcje kontrolera magistrali, a w szczególności załączanie i wyłączanie urządzeń, wymuszenie testu urządzenia i zobrazowanie wyniku testu,
3. odbiór i zobrazowanie określonego komunikatu lub grupy komunikatów w formacie szesnastkowym z podziałem na pola jak w standardzie CAN2.0A i B,
4. wymuszenie wysłania predefiniowanych komunikatów,
5. rejestracja informacji pojawiających się na magistrali z zapisem czasu.

Pierwsze cztery funkcje mają zastosowanie bezpośrednio w czasie pracy systemu. Pozwalają na obserwację stanu samolotu i monitorowanie pracy poszczególnych układów oraz magistrali. Wyniki rejestracji służą do analizy zdarzeń po wykonaniu eksperymentu i dla oceny poprawności przyjętych rozwiązań magistrali mają znaczenie kluczowe. Pozwalają na określenie czy wszystkie informacje znalazły się w odpowiednich chwilach czasowych na magistrali oraz jakie jest rzeczywiste obciążenie magistrali. Na rys.4 widoczne jest okno programu monitora. Każdemu urządzeniu przypisano określone okienko, co ułatwia obserwację i interpretację uzyskiwanych informacji.



Rys.4. Wygląd okna programu monitorującego magistralę systemu

3. STANY PRACY MAGISTRALI

Przyjęto, że magistrala w czasie pracy może znajdować się w kilku stanach. W zależności od aktualnego stanu magistrali każde z urządzeń powinno pracować w odpowiednim trybie. Wyróżnione zostały następujące stany, które mogą dotyczyć całej magistrali bądź poszczególnych urządzeń lub grupy urządzeń:

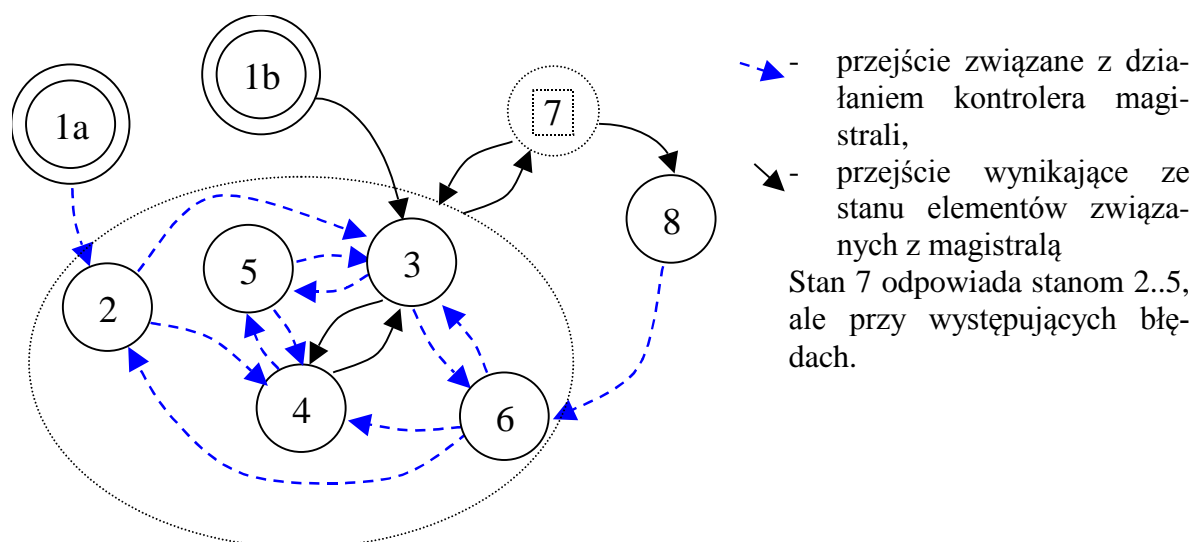
1. **nieaktywny** – brak transmisji, urządzenia w stanie inicjowania, nie rozpoczęły nadawania,
 - a. stan nieaktywny po załączeniu zasilania, który może trwać stosunkowo długo, umożliwiając urządzeniom przeprowadzenie pełnych procedur inicjowania i testowania. Przy określaniu tego stanu uwzględnia się efekty związane z ustalaniem się parametrów pracy (inicjowanie oprogramowania czy nagrzewaniem się układów itp.),
 - b. stan nieaktywny po restarcie urządzenia (stan po chwilowym braku zasilania lub zadziałanie układu watchdoga) powinien być ograniczony do minimum, aby system wszedł do pracy w możliwie krótkim czasie; stan ten różni się od

Ia tym, że pomijane są uzgodnienia a urządzenia synchronizują komunikaty na magistrali, wykorzystując zapisane w pamięci nieulotnej parametry wpisane przed wystąpieniem tego stanu. Jeżeli jakieś urządzenia nie mogą wejść natychmiast do pracy (gdyż stwierdzają błędy działania wymuszające uruchomienie procedur naprawczych, bądź synchronizacji wewnętrznych zmiennych stanu) to przez ten okres wysyłają odpowiednie komunikaty statusu informujące resztę systemu o niezdolności do pracy,

2. **uzgodnienie** – następuje uzgadnianie transmisji po stanie nieaktywnym, w którym to stanie ustalane jest, jakie urządzenia są włączone do magistrali. Stan ten komputer sterujący, pełniący rolę kontrolera magistrali inicjuje a następnie nakazuje przejście do stanu kolejnego po stwierdzeniu, że system jest sprawny,
3. **normalna praca** - wszystkie urządzenia wysyłają informacje zgodnie z założonym cyklem, przy czym stan ten obejmuje każdą z następujących sytuacji:
 - a. magistrala jest chwilowo wolna,
 - b. urządzenie wysyła komunikat synchronizowany odpowiednim zegarem,
 - c. istnieje urządzenie, które nie może wysłać swojego komunikatu, gdyż inne z wyższym priorytetem przejęło magistralę,
 - d. ze względu na chwilowe zaburzenie (np. patrz 1b) niektóre urządzenia nie wysyłają komunikatów danych a jedynie komunikaty statusu,
4. **ograniczona praca** – część urządzeń na magistrali nie nadaje żadnych komunikatów gdyż:
 - a. nastąpiło uszkodzenie urządzenia i jego wyłączenie,
 - b. urządzenie zostało wyłączone przez kontroler magistrali,
5. **wymuszona transmisja przez komputer sterujący** – jest to stan, w którym stany 3 lub 4 zostały chwilowo (na czas transmisji wymuszonej) zawieszono,
6. **arbitraż KS** – komputer sterujący przejmuje kontrolę nad magistralą i wszystkie transmisje są przez niego inicjowane, w tym stanie wyłączona zostaje transmisja synchroniczna,
7. **błąd** – na magistrali występują błędy transmisji, które powodują chwilowe niepoprawne działanie systemu, tj. przerwy w dopływie danych zmuszają do wykorzystania alternatywnych informacji, ale system pracuje w sposób bezpieczny. Jednym ze wskaźników tego stanu jest licznik błędów w interfejsach CAN.
8. **błąd krytyczny** – błąd, który uniemożliwia poprawną pracę systemu.

Za rozróżnienie pomiędzy stanami 7 i 8 odpowiedzialne są procedury diagnostyczne komputera sterującego. Przy poprawnie działających pozostałych dwu magistralach możliwe jest podjęcie próby działań naprawczych przy kontynuacji pracy systemu.

Na rys.5 przedstawiono schemat przejść pomiędzy poszczególnymi stanami.



Rys.5. Schemat przejść pomiędzy stanami magistrali

4. WNIOSKI

W trakcie wykonywania systemu sterowania stwierdzono, że standard ten jest dobrze dopracowany i łatwy do wykorzystania. Przy zachowaniu podstawowych zasad konstruowania układów i prowadzenia sygnałów nie występują problemy z komunikacją. Skuteczne są zastosowane mechanizmy arbitrażu i kontroli błędów realizowane przez układy interfejsu CAN. Kontynuacja prac nad systemem, a w tym wykonanie cyklu prób w locie, pozwoli na dokładniejszą weryfikację dotychczasowych spostrzeżeń. Być może interfejs CAN zostanie wprowadzony na stałe do lotnictwa zgodnie z tendencją wykorzystywania w awionice modułów i układów dostępnych komercyjnie [4], gdy odchodzi się od konstruowania własnych ściśle specjalizowanych, a przez to drogich komponentów.

5. LITERATURA

- [1] CAN specification Version 2.0. Robert Bosch GmbH, 1991.
- [2] KOCKS K.: Systems That Permit Everyone to Fly. Avionics Magazine, March 2001, str. 16-20.
- [3] MIKLUSZKA W.: Diagnostyka i kontrola komunikacji w systemie sterowania PSW/WWT-CAN. XIV Krajowa Konferencja Automatyki, Zielona Góra, 24-27 czerwca 2002, str. 617-622.
- [4] NEWPORT J. R.: Avionics Systems Design. CRC Press, 1994.
- [5] PIENIAŻEK J., TOMCZYK A.: System pomiarowo-nawigacyjny dla samolotów lekkich. VII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne, Rzeszów 2002, tom. I, str. 259-300.
- [6] SPITZER C. R.: Digital Avionics System. McGraw Hill, New York 1992.

AIRCRAFT CONTROL SYSTEM WITH CAN SERIAL INTERFACE

Abstract: In the aircraft control process many digital data is used. Research on the control system and associated measurement devices is implemented in the Department of Avionics and Control of Rzeszow Technical University. One of applied solution is CAN bus using in the Augmented Control System for easy piloted aircraft. Measurement and control devices used in recent project are equipped with CAN interface. Some aspects of this solution are presented in the paper including: hardware configuration, interface states definition and system monitoring.

Recenzent: dr hab. inż. Zdzisław FILUS, prof. Politechniki Śląskiej