

Krzysztof FALKOWSKI  
Maciej HENZEL  
Zdzisław ROCHAŁA  
Wojskowa Akademia Techniczna

## CENTRALA DANYCH AEROMETRYCZNYCH DLA BEZPILOTOWEGO STATKU POWIETRZNEGO

Współczesna centrala danych aerometrycznych to specjalizowany, mikroprocesorowy, lotniczy system do pomiaru pilotażowo-prędkościowych parametrów lotu bezpilotowego statku powietrznego (BSP). W artykule przedstawiono centralę aerometryczną opracowaną w Zakładzie Awioniki i Uzbrojenia Lotniczego, w której ciśnienia całkowite i statyczne przetwarzane są na sygnał elektryczny przez piezorezystancyjne przetworniki ciśnień oraz rezystancyjny czujnik temperatury. Dodatkowo układ ten dokonuje pomiaru aerodynamicznych kątów natarcia i ślizgu.

### Wstęp

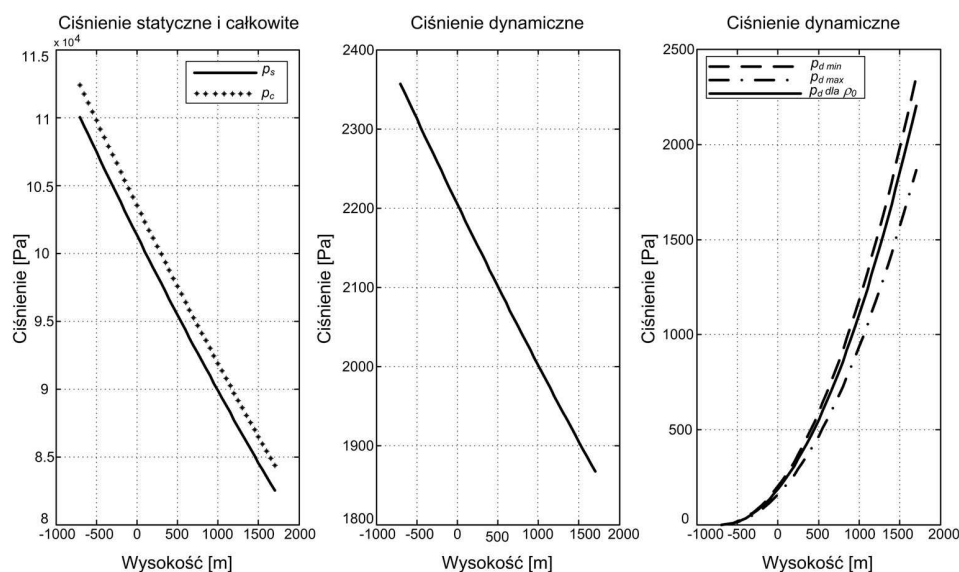
Centrala aerometryczna jest ważnym, autonomicznym elementem wyposażenia współczesnego statku powietrznego, przeznaczonym do pomiaru i obliczania pilotażowo-prędkościowych parametrów lotu bezpilotowego statku powietrznego (BSP). Współczesna centrala to specjalizowany, mikroprocesorowy, lotniczy system pomiarowy, który na podstawie autonomicznego pomiaru ciśnień, temperatury oraz opływu powietrza w sposób pośredni wylicza zarówno parametry lotu (wysokość i prędkość lotu), jak również aerodynamiczne kąty położenia przestrzennego statku powietrznego względem napływających strug powietrza (kąt natarcia i ślizgu) [1].

W zaprojektowanej centrali aerometrycznej ciśnienia całkowite i statyczne przetwarzane są na sygnał elektryczny za pomocą piezorezystancyjnych przetworników ciśnienia statycznego, różnicy ciśnień całkowitego i statycznego oraz rezystancyjnego czujnika temperatury. Do pomiaru kątów natarcia oraz ślizgu zaprojektowano i wykonano czujnik typu „swobodne skrzydełko”. W zaprojektowanej centrali aerometrycznej można wyróżnić moduł czujników pomiarowych oraz moduł jednostki obliczeniowej, przeznaczony do wyliczania zadanych parametrów lotu bezpilotowego statku powietrznego i wymiany danych z jednostką centralną systemu awionicznego. Sygnały wejściowe z czujników pomiarowych zamieniane są na postać cyfrową i dalej przetwarzane przez sys-

tem mikroprocesorowy z mikrokontrolerem ADuC812 firmy Analog Devices. System ten na podstawie opracowanych algorytmów oraz zależności zawartych w Międzynarodowej Atmosferze Wzorcowej (MAW) oblicza parametry lotu bezpilotowego statku powietrznego, które wykorzystywane są przez jego systemy pokładowe, m.in. system automatycznego sterowania oraz rejestracji parametrów lotu [1, 3].

## 1. Charakterystyka środowiska ruchu BSP

Naturalnym środowiskiem ruchu BSP jest atmosfera ziemską, która stanowi gazową powłokę Ziemi z zawieszonymi w niej cząstkami niegazowymi. Środowisko to jest jednorodne i można w nim wyodrębnić warstwy różniące się m.in. składem, temperaturą, ciśnieniem i gęstością.



Rys. 1. Parametry środowiska ruchu BSP

Zaprojektowana centrala aerometryczna zostanie zabudowana na bezpilotowym statku powietrznym, który porusza się w zakresie rzeczywistej wysokości lotu do 1500 m z prędkością maksymalną 60 m/s. Dla tak przyjętych warunków lotu obliczono parametry środowiska ruchu BSP z uwzględnieniem zależności zawartych w Międzynarodowej Atmosferze Wzorcowej. Przebieg zmian poszczególnych parametrów środowiska przedstawiono na rys. 1. Zaprojektowana centrala aerometryczna dokonuje pomiarów i obliczeń w układzie barometrycznym, dlatego podczas analizy wszystkich parametrów środowiska i ruchu

BSP przyjęto zakres zmian barometrycznej wysokości lotu z uwzględnieniem MAW od  $-700$  m do  $+1700$  m.

Jak wynika z MAW i przedstawionych charakterystyk (rys. 1.), wartości poszczególnych parametrów zmieniają się w zakresie:

- ciśnienie statyczne  $p_s$  – od  $1\,100,23$  do  $825,059$  hPa ( $825,24 \div 618,85$  mmHg),
- gęstość powietrza  $\rho$  – od  $1,309$  do  $1,037$  kg/m<sup>3</sup>,
- temperatura powietrza  $t$  – od  $19,55$  do  $3,95^\circ\text{C}$ .

Dodatkowo do dalszych analiz wyznaczono zmianę ciśnienia dynamicznego powietrza w funkcji wysokości lotu BSP w celu określenia jego zakresu i charakteru zmian. Z obliczeń wynika, że maksymalna wartość ciśnienia dynamicznego wynosi ok.  $23,57$  hPa. Wartość tego ciśnienia zależy przede wszystkim od gęstości powietrza, które zmienia się wraz z wysokością i prędkością lotu BSP. Dla przyjętych parametrów atmosfery oraz ruchu BSP wyznaczono jego parametry prędkościowe:

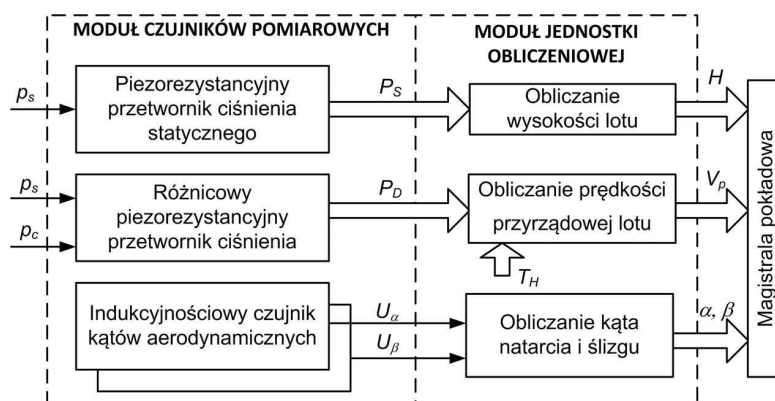
- prędkość przyrządową  $V_p$  –  $0 \div 62,03$  m/s,
- prędkość rzeczywistą  $V_{rz}$  –  $0 \div 60$  m/s.

Obliczone parametry środowiska ruchu BSP oraz jego parametry pilotażowo-prędkościowe zostały wyznaczone do oceny poprawności działania algorytmów przetwarzania centrali aerometrycznej oraz doboru zakresów pomiarowych czujników.

## 2. Struktura centrali aerometrycznej

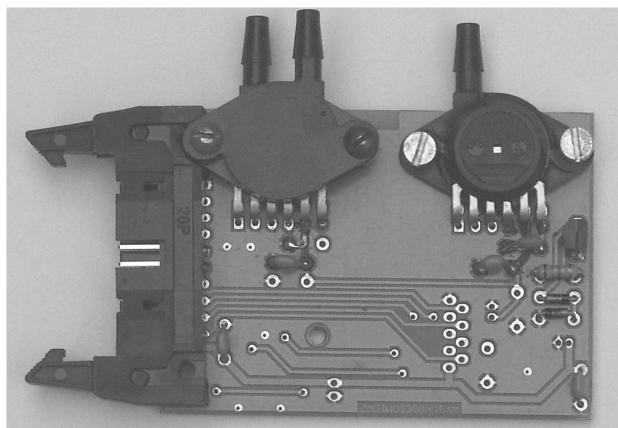
W strukturze centrali aerometrycznej można wyróżnić funkcjonalnie moduł czujników pomiarowych i moduł jednostki obliczeniowej (rys. 2.). Zadaniem pierwszego z modułów jest pomiar właściwości atmosfery poprzez pomiar ciśnienia statycznego  $p_s$ , ciśnienia całkowitego  $p_c$  i temperatury powietrza  $t_H$ . Dalej zmierzone wartości podawane są do modułu jednostki obliczeniowej, w którym zostają przeliczone na parametry wysokościowo-prędkościowe ruchu BSP, tj. wysokość względną i bezwzględną, prędkość rzeczywistą, podróżną oraz pionową lotu [2].

Kolejnymi parametrami lotu wyznaczanymi w module obliczeniowym centrali aerometrycznej są kąt natarcia i ślizgu. Podstawową trudnością w pomiarze tych kątów aerodynamicznych jest umiejscowienie czujników pomiarowych w niezaburzonym strumieniu powietrza. Aby ułatwić pomiar, zaprojektowano czujnik kąta natarcia (ślizgu) typu „swobodne skrzydełko”, który połączony jest mechanicznie z indukcyjnościowym przetwornikiem kąta. Takie rozwiązanie czujnika pomiaru aerodynamicznych parametrów lotu BSP odznacza się prostotą konstrukcji oraz możliwością pomiaru kąta przy stosunkowo niedużych prędkościach lotu BSP.



Rys. 2. Struktura centrali aerometrycznej

Pierwszym blokiem funkcjonalnym centrali aerometrycznej jest moduł czujników pomiarowych, którego zadaniem jest przetworzenie informacji o warunkach lotu BSP na sygnał analogowy lub cyfrowy. W projektowanym układzie wykorzystano czujnik ciśnienia absolutnego, mierzący ciśnienie statyczne, różnicowy czujnik do pomiaru ciśnienia całkowitego i statycznego, na którego wyjściu uzyskuje się sygnał proporcjonalny do wartości ciśnienia statycznego, rezystancyjny czujnik temperatury oraz indukcyjnościowy czujnik kąta natarcia (ślizgu).

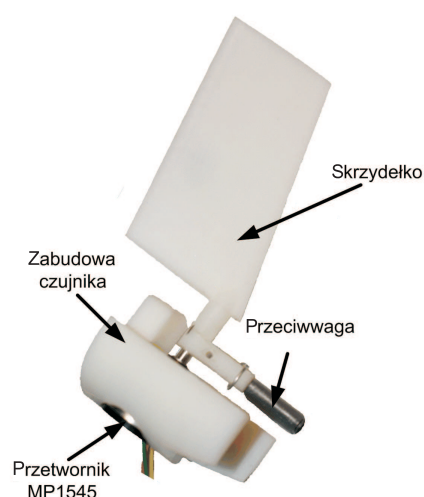


Rys. 3. Model prototypu centrali aerometrycznej

Do pomiaru ciśnień wykorzystane zostały czujniki z wyjściem cyfrowym o zakresie pomiarowym 840÷1100 hPa (czujnik ciśnienia barometrycznego) i 0÷450 hPa (różnicowy czujnik ciśnienia). W przetwornikach tych mierzone ciśnienie podawane jest na sensor piezorezystancyjny, a dalej na przetwornik analogowo-cyfrowy (A/C) i układ mikrokontrolera (rys. 3.). Zabudowany

w czujniku sensor posiada układ kompensacji temperatury, co zapewnia prawidłowy pomiar ciśnienia w temperaturze otaczającego środowiska od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+85^{\circ}\text{C}$ .

Kolejnym przetwornikiem jest rezystancyjny przetwornik temperatury, w którym wykorzystuje się zmiany oporu elektrycznego pod wpływem zmiany mierzonej temperatury. Do pomiaru temperatury wykorzystano przetwornik firmy Honeywell serii 703 z elementem pomiarowym z cienkiego filmu platyny, który charakteryzuje się miniaturowymi rozmiarami.



Rys. 4. Indukcyjnościowy czujnik przemieszczeń kątowych MP1545 z czujnikiem „swobodne skrzydełko”

Do pomiaru kątów aerodynamicznych wykorzystano natomiast przetwornik indukcyjnościowy firmy Megatron MP1545. Przetwornik ten jest transformatorowym przetwornikiem różnicowym i składa się z obrotowej kotwicy, która powoduje zmianę indukcyjności, uzwojenia wtórnego i pierwotnego. Na rysunku 4. pokazano zaprojektowany i wykonany czujnik typu „swobodne skrzydełko” wraz z przetwornikiem indukcyjnościowym. W strukturze tej można wyróżnić ruchome skrzydełko z przeciwwagą oraz element zabudowy czujnika, który umiejscowiony jest wewnątrz kadłuba BSP.

Głównym modulem przetwarzającym dane pomiarowe jest moduł jednostki obliczeniowej, którego budowa oparta jest na systemie mikroprocesorowym z mikrokontrolerem firmy Analog Devices. Zadaniem tego modułu jest obliczanie, na podstawie sygnałów wyjściowych z modułu, czujników pomiarowych parametrów ruchu BSP. W tym przypadku elementem głównym jest mikrokontroler ADuC812, w którego strukturze można wyróżnić:

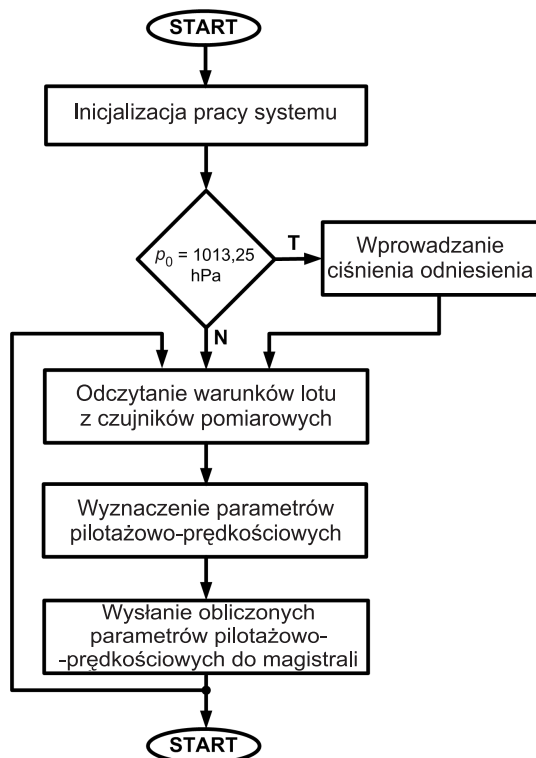
- rdzeń mikrokontrolera 8051,
- pamięć – 8 kB wewnętrznej pamięci programu typu Flash, 256 B wewnętrznej pamięci danych RAM, 640 B wewnętrznej pamięci danych ty-

pu Flash; istnieje możliwość adresowania zewnętrznej pamięci programu typu ROM (64 MB),

- układy analogowe – 8-kanałowy 12-bitowy przetwornik A/C, wewnętrzne skompensowane temperaturowo źródło napięcia odniesienia, dwa 12-bitowe przetworniki C/A, czujnik temperatury,
- układ peryferiów – interfejs szeregowy RS-232, interfejs I<sup>2</sup>C.

Czujniki z modułu pomiarowego podłączone są 12-bitowym przetwornikiem A/C (czujniki kątów aerodynamicznych) oraz interfejsem I<sup>2</sup>C (przetworniki ciśnień).

Zmierzone parametry przetwarzane są w jednostce obliczeniowej centrali aerometrycznej według przyjętego algorytmu (rys. 5.). Algorytm ten rozpoczyna się inicjalizacją pracy mikrokontrolera, która obejmuje m.in. ustawienie współczynników kalibracji przetworników A/C, ustawienie sygnału taktowania procesora, ustawienie rejestrów roboczych układów wejścia – wyjścia. Właściwa część algorytmu rozpoczyna się od ustawienia wartości ciśnienia odniesienia. W przypadku lotu BSP wykonywanego z miejsca o ciśnieniu atmosferycznym różnym od ciśnienia normalnego według MAW (1013,25 hPa) należy wprowadzić wartość ciśnienia odniesienia. Wielkością tą jest bieżące ciśnienie panujące



Rys. 5. Algorytm działania centrali aerometrycznej

w miejscu startu BSP. W kolejnym kroku działania następuje odczyt sygnałów z czujników pomiarowych i ich przetworzenie przez przetwornik analogowy (kąty aerodynamiczne) oraz interfejs I<sup>2</sup>C (ciśnienia powietrza). Zmierzone wartości są dalej przetwarzane na parametry wysokościowo-prędkościowe lotu BSP i przesyłane do innych systemów pokładowych poprzez magistralę pokładową.

Na potrzeby obserwacji i oceny poprawności działania centrali informacje przez nią przetworzone są przesyłane do stacji naziemnej oraz przechowywane w module rejestracji parametrów lotu BSP. Podstawowymi parametrami obliczanymi w centrali aerometrycznej są wysokość względna i rzeczywista prędkość lotu BSP. Do tego wykorzystywane są zależności:

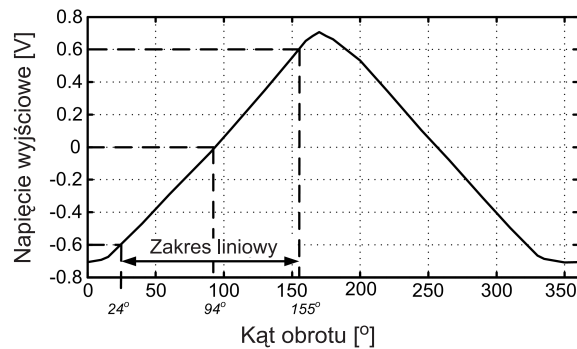
- wysokość względna

$$H_{wzgl} = \frac{T_0}{t_{gr}} \left[ 1 - \left( \frac{p_h}{p_0} \right)^{t_{gr} R} \right] - \frac{T_0}{t_{gr}} \left[ 1 - \left( \frac{p_{odn}}{p_0} \right)^{t_{gr} R} \right] \quad (1)$$

- prędkość rzeczywista

$$V_{rz} = 1,41 \sqrt{\frac{p_d}{\rho_h}} \quad (2)$$

gdzie:  $T_0 = 288K$  – temperatura odniesienia nad poziomem morza,  $p_0 = 1013,25$  hPa – ciśnienie odniesienia nad poziomem morza,  $p_{odn}$  – ciśnienie odniesienia miejsca startu lub lądowania,  $p_h$  – statyczne ciśnienie powietrza na wysokości lotu,  $p_d$  – dynamiczne ciśnienie powietrza,  $\rho_h$  – gęstość powietrza na wysokości lotu,  $t_{gr}$  – gradient temperatury,  $R$  – stała gazowa.



Rys. 6. Charakterystyka statyczna układu do pomiaru kątów aerodynamicznych

Kąty położenia przestrzennego BSP określone są na podstawie zmierzonego napięcia wyjściowego czujnika indukcyjnościowego MP1545 połączonego

z czujnikiem typu „swobodne skrzydełko”. W tym celu wyznaczono charakterystykę statyczną układu pomiarowego kątów aerodynamicznych, której przebieg pokazano na rys. 6. Jak wynika z podanej charakterystyki, liniowy zakres zmiany kąta wynosi od  $-24$  do  $155^\circ$ , dla którego na wyjściu otrzymuje się napięcie  $\pm 0,6$  V. Jest ona niesymetryczna, w związku z tym jej zakres pomiarowy należy uwzględnić podczas przetwarzania wartości kąta aerodynamicznego.

### 3. Uwagi końcowe

W artykule przedstawiono konstrukcję i zasadę działania centrali aerometrycznej przeznaczonej do pomiaru i wyliczenia pilotażowo-prędkościowych parametrów lotu BSP. W tym celu opracowano projekt systemu pomiarowego, który realizuje funkcje i zadania charakterystyczne dla lotniczej centrali aerometrycznej. Obejmuje on czujnik do pomiaru kąta natarcia i ślizgu BSP, układ przetwarzania wartości ciśnień powietrza oraz jednostkę obliczeniową opartą na mikrokontrolerze ADuC812. Wszystkie parametry obliczane są zgodnie z zależnościami zapisanymi w Międzynarodowej Atmosferze Wzorcowej. Po zakończeniu etapu badań laboratoryjnych zaprojektowane elementy zostaną przebadane w locie.

*Temat realizowany w ramach finansowanego w latach 2007-2010 przez MNiSW projektu badawczego własnego nr ON509003633.*

### Literatura

- [1] Helfrick A.: Principles of avionics, Avionics Communication, Leesburg, USA 2005.
- [2] Homziuk A., Rochala Z., Sobieraj W.: Problemy sterowania miniaturowymi bezzałogowymi statkami powietrznymi, Journal of Aeronautica Integra, nr 1, Rzeszów 2008, s. 45÷50.
- [3] Kayton M., Fried W.R.: Avionics navigation systems, John Wiley & Sons, New York 1997.

### AIR DATA COMPUTER FOR UAV

#### Abstract

The air data computer is a special air dedicate microprocessor system, which intermediate estimates the barometric altitude, indicated airspeed, vertical speed, total air temperature, angle of attack and the sideslip from the dynamic and static pressure, temperature and air flow around the aircraft.



The air data computer is designed in the Institute of Aviation. The dynamic and static pressures are converted to electrical signal by piezoelectric static pressure sensor (static pressure) and differential pressure sensors (difference between static and total pressure). The angle of attack and sideslip are measured by the flow – direction vanes. The vane measures direction of local flow of air. The processor unit of the air data computer obtains flight parameters of UAV and communicates with central unit of avionics system of UAV. The analog signals from sensors conversion to digital and they process by microcontroller ADuC812. The algorithms of evaluation of flight parameters take into consideration the International Standard Atmosphere.

*Złożono w Oficynie Wydawniczej w sierpniu 2011 r.*