

SYSTEM DO POMIARU I REJESTRACJI WYBRANYCH PARAMETRÓW PILOTAŻOWO NAWIGACYJNYCH WIATRAKOWCA

WITOLD DĄBROWSKI, STANISŁAW POPOWSKI, RADOSŁAW RYBANIEC

Institut Lotnictwa

Streszczenie

W artykule opisano system do pomiaru i rejestracji parametrów wiatrakowca. Szczegółowo przedstawiono funkcje systemu oraz opisano zasadę pracy wybranych czujników pomiarowych. Przedstawiono też wyniki wybranych badań laboratoryjnych systemu i badań na ruchomym obiekcie, samochodzie. Zamieszczono niektóre z zarejestrowanych przebiegów. Dotychczasowe pozytywne wyniki badań pozwalają na wykonanie w następnym kroku badań na pokładzie wiatrakowca.

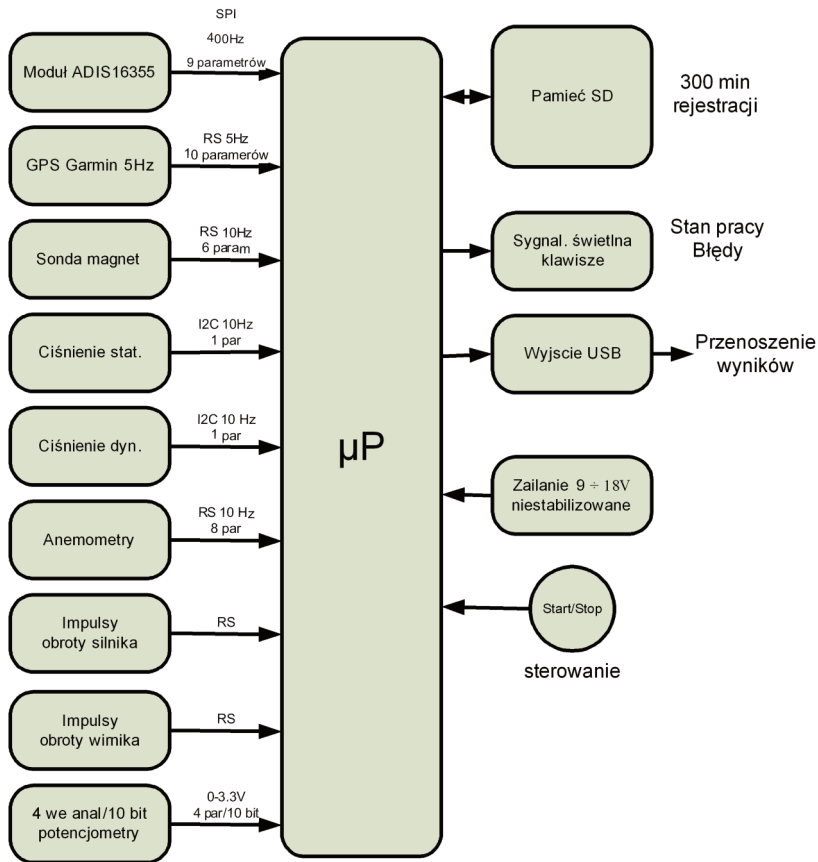
1. WSTĘP

Loty na wiatrakowcu bardzo często wykonuje się na małych wysokościach i małych prędkościach. Z reguły są to loty w strefach niebezpiecznych H-V, dla których bezpieczne lądowanie w autorotacji nie jest możliwe [2]. Ze względów bezpieczeństwa w trakcie tych lotów pilot jest zmuszony śledzić najbliższe otoczenie, a nie tablicę przyrządów. W związku z tym powstała koncepcja stworzenia systemu, który z jednej strony mierzyłby na bieżąco krytyczne parametry lotu wiatrakowca i rejestrowałby je na odpowiednim nośniku. A z drugiej strony w oparciu o odpowiednie kryteria dałby na bieżąco ocenę bezpieczeństwa lotu. W przypadku wystąpienia stanu obniżonego bezpieczeństwa system za pomocą sygnału akustycznego ostrzegałby pilota przed zagrożeniem.

Niniejsza praca dotyczy wykonania pierwszej części zadania, w ramach, której wykonano system pomiarowo-rejestrujący parametry lotu wiatrakowca. Parametry te mogłyby stanowić podstawę do wyznaczenia kryterium bezpieczeństwa.

2. OPIS WYKONANEGO SYSTEMU POMIAROWO-REJESTRUJĄCEGO

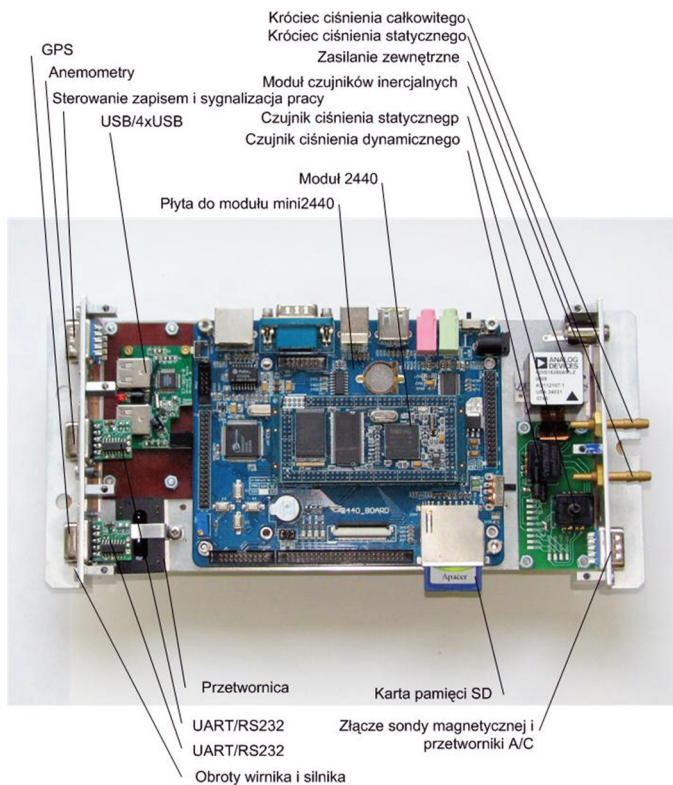
Strukturę systemu pomiarowo rejestrujący przedstawiono na rys. 1. Jak widać system złożony jest z czujników pomiarowych wielkości fizycznych, jednostki centralnej, urządzeń wejścia/wyjścia, zewnętrznej pamięci i układu zasilania.



Rys. 1. Schemat systemu pomiarowo-rejestrującego

W systemie wykorzystano różne czujniki pomiarowe oraz dla każdego z nich dobrano odpowiednie częstotliwości próbkowania. Pierwowzorem wykonanego systemu był wykonany układ pomiarowy do pomiarów i rejestracji parametrów śmigłowca [1]. Podstawowym układem pomiarowym jest system orientacji wykorzystujący trzy giroskopy, trzy przyspieszeniomierze oraz trzy czujniki temperatury giroskopów do kompensacji błędów temperaturowych (ADIS). Częstotliwość tych pomiarów ustalono na 400 Hz. Z tym systemem współpracuje sonda magnetyczna, która dostarcza kurs magnetyczny, składowe wektora indukcji magnetycznej ziemskiego pola magnetycznego oraz zgrubne kąty pochylenia i przechylenia. Częstotliwość tych pomiarów wynosi 10 Hz. Następnym ważnym systemem jest odbiornik GPS, który dostarcza dane o położeniu (trzy współrzędne), kącie drogi oraz trzech składowych prędkości względem ziemi. Częstotliwość dostępności tych danych wynosi 5 Hz. Mierzone są też wielkości ciśnienia statycznego i całkowitego (rurka Prandtla i czujniki ciśnienia typu MEMS) z częstotliwością 10 Hz oraz prędkości względem powietrza w dowolnych punktach wiatraczowca (do 8 punktów pomiarowych w zakresie ± 20 m/s). Pomiar prędkości względem powietrza dokonywane są za pomocą anemometrów wiatraczkowych [3]. Do tego samego wejścia, co anemometry, dołączono bezkontaktowe czujniki prędkości obrotowej wirnika i silnika napędowego. Poza wymienionymi czujnikami istnieje możliwość dołączenia czterech sygnałów napięciowych do czterech przetworników analog-cyfra. Wszystkie sygnały z czujników dochodzą do jednostki centralnej, zbudowanej na module mini2440 firmy Samsung. Sterowanie pracą układu

i zapisem danych odbywa się za pomocą dwuklawiszowej klawiatury, a wyświetlanie stanu pracy systemu zorganizowano na trzech diodach LED. Zapis mierzonych parametrów jest na karcie pamięci typu SD.



Rys. 2 Widok układu pomiarowo-rejestrującego (bez obudowy)

Zasilanie systemu jest z oddzielnego akumulatora 12 V, pobór prądu na poziomie poniżej 0,5 A. Na rysunku 2 przedstawiono widok jednostki centralnej wraz z czujnikami ciśnienia i inercyjnymi zabudowanymi w obudowie, a na rys. 3 widok zewnętrzny urządzenia.



Rys. 3. Widok systemu pomiarowo-rejestrującego



Rys. 4. Elementy systemu pomiarowo-rejestrującego

3. FUNKCJE SYSTEMU POMIAROWO-REJESTRUJĄCEGO

Opracowany system pomiarowo-rejestrujący parametrów lotu wiatrakowca realizować ma następujące funkcje:

1. akwizycję danych z modułu czujników inercjalnych ADIS 16355:
 - a. prędkości kątowych i przyspieszeń w trzech osiach z częstotliwością 400 Hz,
 - b. temperatur czujników (giroskopów) z częstotliwością 100 Hz;
2. akwizycję danych z modułu odbiornika nawigacji satelitarnej Garmin18 z częstotliwością 5 Hz:
 - a. czasu,
 - b. liczby satelitów w zasięgu,
 - c. długości i szerokości geograficznej oraz wysokości,
 - d. prędkości: wschodnią, północną, pionową oraz wypadkową w płaszczyźnie horyzontu,
 - e. kąta drogi;
3. akwizycję danych z sondy magnetycznej Honeywell HMC6343 z częstotliwością 10 Hz:
 - a. kursu magnetycznego,
 - b. pochylenia i przechylenia,
 - c. składowych pola magnetycznego w trzech osiach;
4. pomiar ciśnienia statycznego i dynamicznego z częstotliwością 100 Hz;
5. akwizycję wyników pomiaru prędkości powietrza z modułu anemometrów z częstotliwością 10 Hz (do 8 kanałów);
6. pomiar 4 wartości napięć z zakresy 0-3,3 V, z częstotliwością 100 Hz;
7. zapis danych z pkt. 1-6 do pliku tekstowego o następujących cechach:
 - a. format dat,
 - b. nazwa pliku nadawana automatycznie na podstawie czasu startu pomiaru: ROK-MIESIĄC-DZIEŃ GODZINA.MINUTA.SEKUNDA.dat,
 - c. zapis do pliku numeru każdej próbki i czasu pobierania próbki,
 - d. zapis ilości pobranych próbek i objaśnienia pól,
 - e. zapis na karcie pamięci SD;
8. automatyczne przenoszenie danych z pamięci SD po podłączeniu do złącza USB zewnętrznej pamięci;

9. sterowanie urządzeniem za pomocą klawiatury dwuprzyciskowej;
10. wyświetlanie informacji o pracy urządzenia za pomocą 3 diod LED:
 - a. sygnalizacja stanu spoczynku i stanu zbierania danych,
 - b. sygnalizacja błędu komunikacji z modułami,
 - c. sygnalizacja procesu kopiowania danych oraz braku miejsca na karcie pamięci.

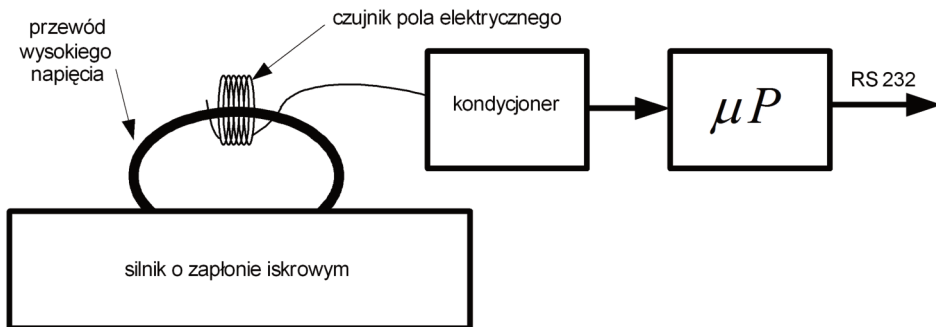
Po podłączeniu zewnętrznych czujników oraz urządzenia sterującego (rys. 4) przeprowadzono szereg badań i testów w celu wyeliminowania błędów, zarówno oprogramowania, jak i sprzętu. Po zakończeniu badań osiągnięto stan zgodny z przedstawionymi na wstępie założeniami.

4. OPIS WYBRANYCH CZUJNIKÓW POMIAROWYCH SYSTEMU POMIAROWO-REJESTRUJĄCEGO

Bezkontaktowe czujniki prędkości silnika i wirnika

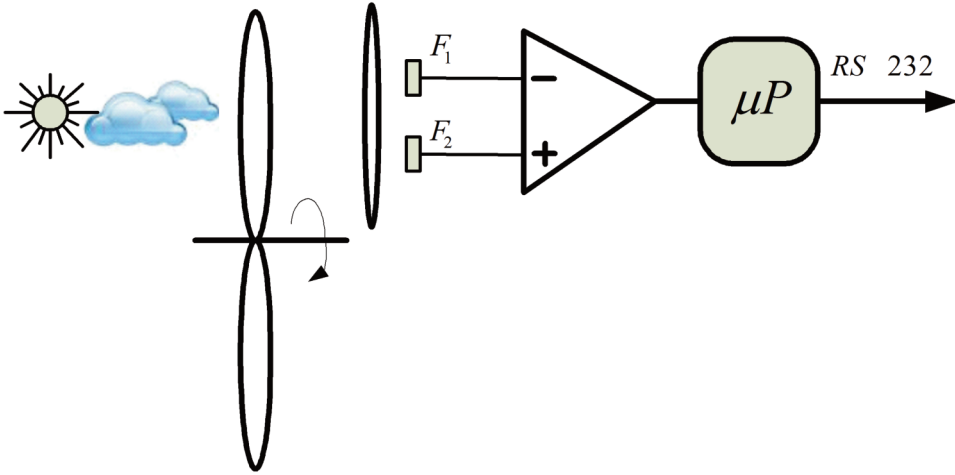
Zaprojektowano i wykonano czujnik prędkości obrotowej silnika oraz czujnik pomiaru prędkości obrotowej wirnika. Czujniki są elektrycznie i mechanicznie odizolowane od badanych elementów wiatrakowca, są bezkontaktowe.

Pomiar prędkości obrotowej silnika napędowego (rys. 5) wykorzystuje pole elektryczne wytwarzane przez iskrowy układ zapłonowy silnika, indukowanie napięcia następuje w przewodzie pomiarowym umieszczonym obok przewodu wysokiego napięcia układu zapłonowego. Indukowany sygnał wprowadzany jest ekranowanym przewodem do układu pomiarowego, gdzie jest kształtowany do postaci sygnału logicznego. Sygnał ten jest podawany na wejście do procesora, który wylicza częstotliwość wirowania silnika napędowego. Wynik pomiaru wystawiany jest w postaci cyfrowej zgodnie z protokołem RS232.



Rys. 5. Idea bezkontaktowego czujnika prędkości obrotowej silnika o zapłonie iskrowym

Pomiar prędkości obrotowej wirnika (rys. 6 i 7) polega na wychwytywaniu i zliczaniu w czasie zmian natężenia światła. Modulacja amplitudy strumienia świetlnego wywoływana jest przysłonięciem tła świetlnego przez łopatkę wirnika nośnego. Pomiar realizowany jest przy pomocy dwóch układów F1 i F2 będących przetwornikami światło-napięcie. Jeden z tych układów stanowi odniesienie zmierzonej ilości światła. Różnica napięć przetworników będąca następstwem przesłonięcia jednego układu, powoduje, że wyjście logiczne komparatora przechodzi w stan wysoki. Sygnał ten jest podawany na wejście do procesora, który wylicza częstotliwość wirowania wirnika nośnego i wystawia sygnał częstotliwości łączem RS232.



Rys. 6. Idea bezkontaktowego czujnika prędkości obrotowej wirnika



Rys. 7. Widok bezkontaktowego czujnika do pomiaru prędkości obrotowej wirnika

5. OPROGRAMOWANIE SYSTEMU POMIAROWO-REJESTRUJĄCEGO

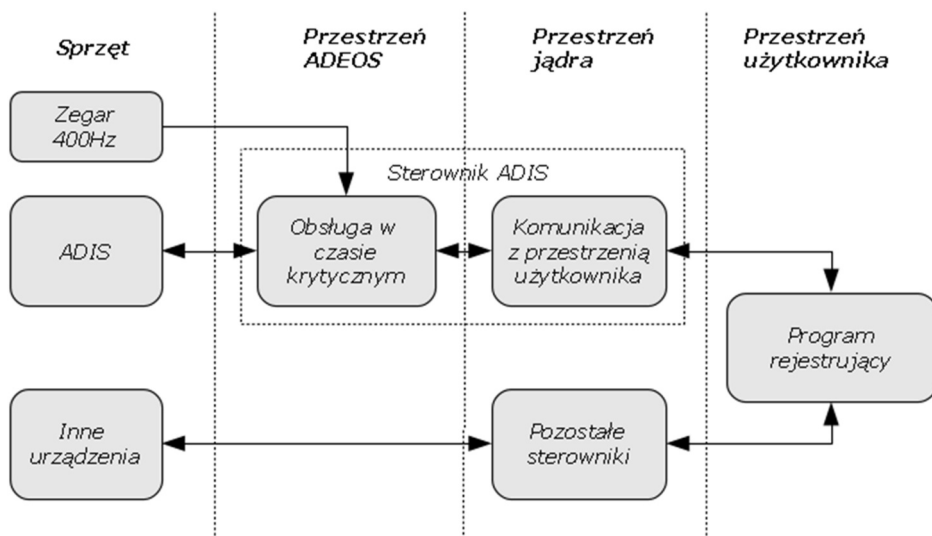
Oprogramowanie systemu pomiarowo-rejestrującego jest oparte na systemie operacyjnym Linux. Jest to wielozadaniowy system operacyjny ogólnego przeznaczenia, stosowany zarówno w komputerach osobistych, serwerach, jak również w systemach wbudowanych. Jego znamienitą cechą jest dostępność kodu źródłowego i liberalne licencjonowanie pozwalające na przeprowadzanie dowolnych modyfikacji i korzystanie z systemu bez opłat również do celów komercyjnych.

Zasadniczą trudnością podczas tworzenia oprogramowania, było uzyskanie odpowiedniej charakterystyki czasowej. Głównym problemem było uzyskanie stałej częstotliwości 400 Hz akwizycji z układu ADIS. Ponieważ Linux bez odpowiednich dodatków nie spełnia rygorów czasu rzeczywistego, to wymaganą pracę układu zapewniło dopiero użycie rozszerzenia ADEOS [4].

ADEOS (Adaptive Domain Environment for Operating Systems) jest rozszerzeniem jądra Linuksa polegającym na dodaniu bloku przechwytyjącego przerwanie sprzętowe, i decydującym czy przekazać dane przerwanie do jądra, czy obsłużyć je natychmiast. W ten sposób krytyczne przerwania mogą być obsługiwane z minimalnym narzutem czasowym. W uzyskanym

systemie czas od pojawienia się do obsługi przerwania jest ograniczony i ma praktycznie charakter deterministyczny.

Schemat oprogramowania znajduje się na rysunku 8. W proponowanym systemie zrezygnowano ze sterownika magistrali SPI dostępnego standardowo w Linuksie i zastąpiono własnym, korzystającym z rozszerzenia ADEOS. W sterowniku tym, można wydzielić dwie zasadnicze części. Pierwsza z nich odpowiada za komunikację z układem ADIS i synchronizację czasu z zegarem sprzętowym 400 Hz. Ten fragment sterownika jest uruchamiany w dokładnie ustalonych odstępach czasu dzięki umieszczeniu go w przestrzeni ADEOS. Danym odczytanym z ADIS-a jest nadawany „stempel czasowy”, a następnie są one buforowane w pozostałej części sterownika umieszczonej w przestrzeni jądra. Ta z kolei odpowiada za transfer danych do przestrzeni użytkownika, gdzie wygórowane rygory czasowe nie występują, ponieważ dokładny czas akwizycji został zapamiętany w „stemplach”.



Rys. 8. Schemat oprogramowania

Częstotliwość akwizycji z pozostałych urządzeń jest na tyle niska, że nie było potrzeby stosowania rozszerzenia ADEOS i komunikacja odbywa się z udziałem standardowych sterowników dostarczonych wraz z jądrem.

6. WSTĘPNE WYNIKI BADAŃ UKŁADU POMIAROWO-REJESTRUJĄCEGO

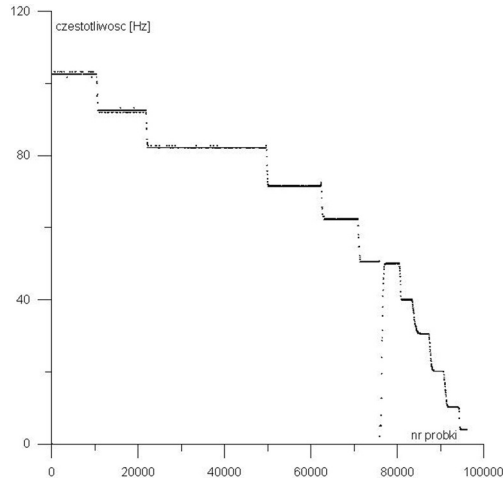
Badania naziemne wykonanego systemu podzielono na dwie części. W pierwszej dokonano prób w warunkach laboratoryjnych, polegających na wzorcowaniu poszczególnych czujników oraz na sprawdzeniu działania całego systemu na stacjonarnym stoisku pomiarowym do torowania łopat. Część tych badań została przyjęta na podstawie wcześniejszych prac.

Następnie wykonano badania całego systemu pomiarowo-rejestrującego na poruszającym się obiekcie. Jako obiekt badań wykorzystano samochód.

Wyniki badań laboratoryjnych

Poniżej przedstawiono wyniki badań czujników prędkości obrotowej silnika oraz czujnika prędkości obrotowej wirnika.

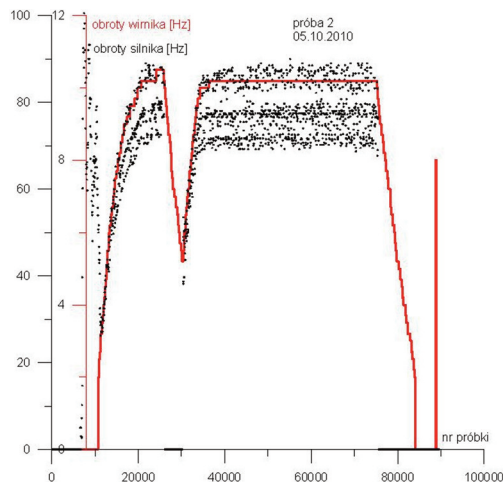
Na rys. 9 przedstawiono wynik skalowania czujnika prędkości kątovej silnika za pomocą generatora wzorcowego. Wynik został pozytywnie zweryfikowany. Częstotliwość podawana na wejście czujnika odpowiadała zarejestrowanej w zbiorze wynikowym.



Rys. 9. Wzorcowanie czujnika prędkości obrotowej silnika za pomocą generatora

Następnie wykonano rejestrację prędkości obrotowej silnika oraz wirnika na stanowisku do torowania łopat wiatrakowca. W stanowisku tym silnik jest sztywno sprzężony z wirnikiem poprzez przekładnię. Pomiar prędkości obrotowej silnika oraz pomiar prędkości wirowania wirnika odbywał się opisanymi powyżej czujnikami.

Wynik zarejestrowany podczas próby przedstawiono na rys. 10. Linia ciągła czerwona, przedstawia wykres prędkości obrotowej wirnika, a kropkowana, silnika. Jak widać wykres prędkości wirnika jest jednoznaczny, przedstawia jedną linię. Za to wykres prędkości obrotowej silnika tworzą trzy równoległe przebiegi. Taka sytuacja podczas badań generatorem nie miała miejsca. Wynika z tego, że postać tego wykresu jest pochodną cech szczególnych zastosowanego silnika, w którym pojawiały się impulsy wielokrotne. Kształt i charakter obu przebiegów jest zgodny.



Rys. 10. Wykres prędkości obrotowej silnika i wirnika uzyskany podczas torowania

Wyniki badań na obiekcie ruchomym (samochodzie)

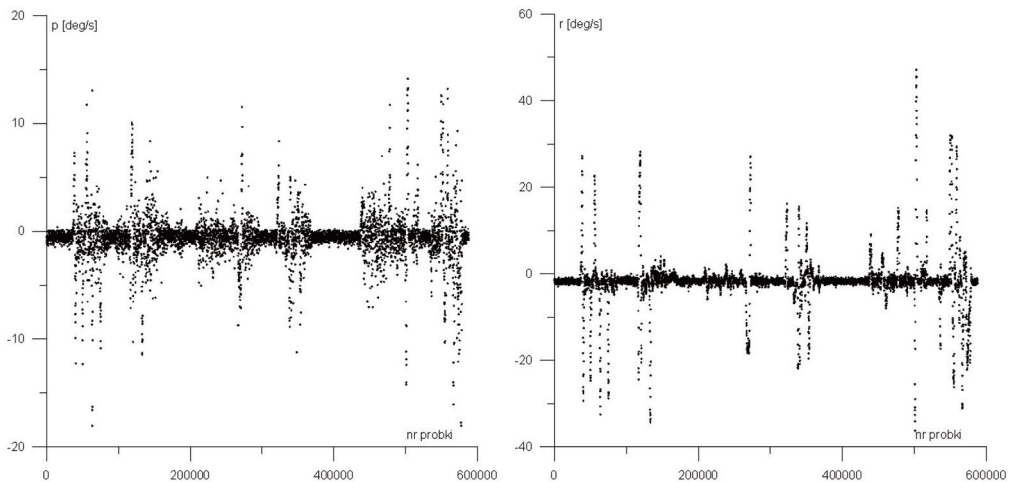
Na samochodzie przeprowadzono kompleksowe badania całego systemu pomiarowo-rejestrującego. W sumie wykonano 16 pełnych rejestracji o czasie trwania ok. 20 minut każda. W czasie każdej z prób rejestrowano wszystkie parametry, które w warunkach naziemnych dały się zmierzyć. Na rys. 11 przedstawiono sposób instalacji rurki spiętrzeniowej oraz turbinki anemometru.

Czas 20 minut ustalono, jako czas przeciętnego lotu próbnego wiatrakowca.

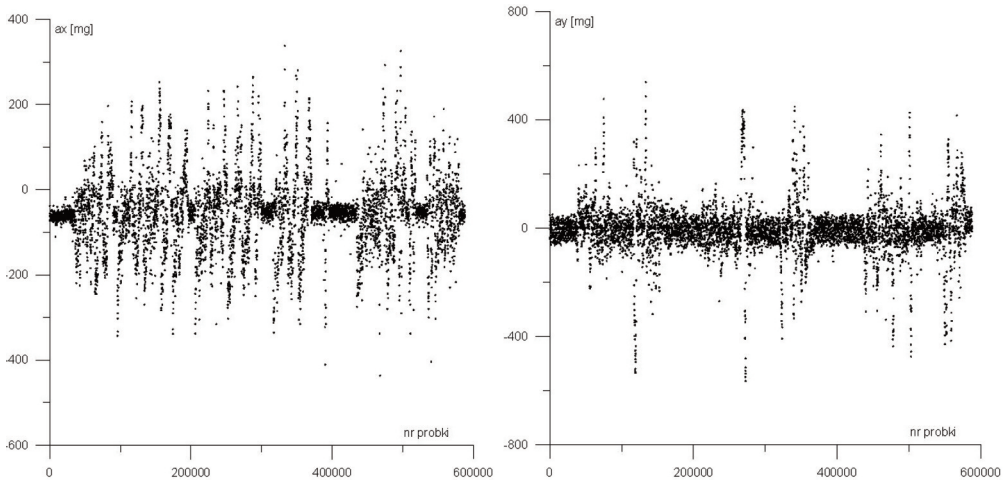


Rys. 11. Sposób zamocowania rurki Prandtla i anemometru na samochodzie

Na rys.12 przedstawiono przykładowe wykresy prędkości kątowych względem osi x i z samochodu. Maksymalne prędkości kątowe zaobserwowano względem osi z. Wynoszą one ok. 50 deg/s. Na rys. 13 przedstawiono przyspieszenia liniowe mierzone wzdłuż osi x i y samochodu. W osi y osiągają one podczas zakrętów wartości powyżej 0,5 g.



Rys. 12. Zarejestrowane prędkości kątowe względem osi x i z samochodu (p i r)

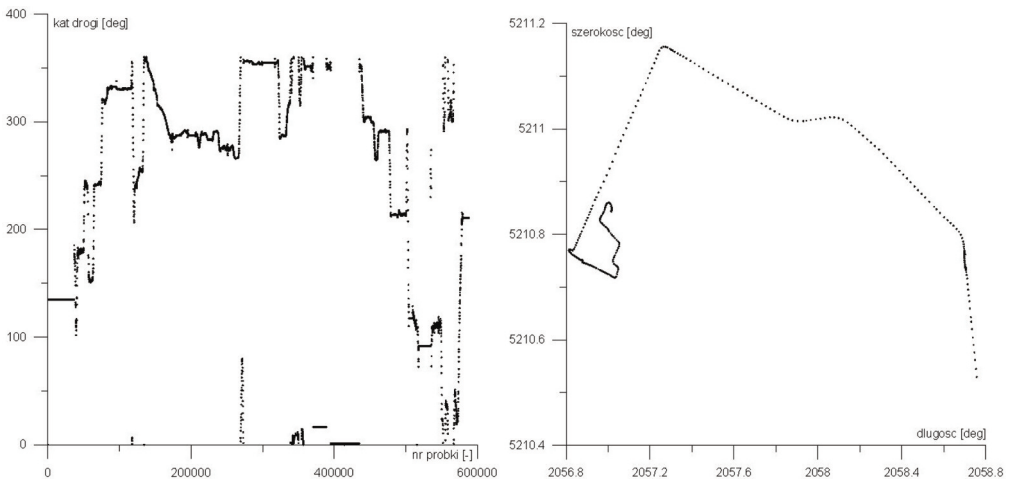


Rys. 13. Zarejestrowane przyspieszenia liniowe względem osi x i y samochodu (a_x i a_y)

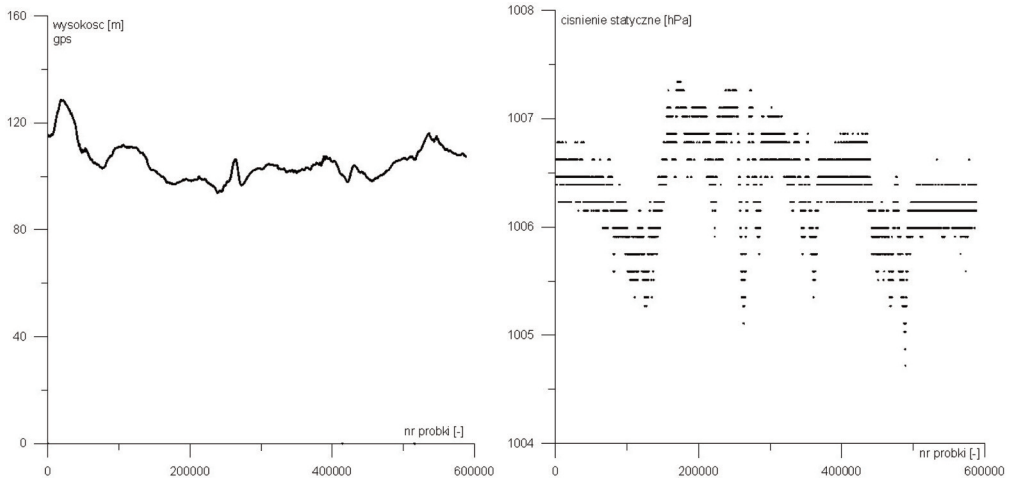
Na rysunku 14 przedstawiono dane uzyskane z odbiornika GPS. Z lewej strony pokazany jest wykres kąta drogi w czasie, a z prawej strony trajektoria w płaszczyźnie horyzontalnej. Z kolei na rysunku 15 z lewej strony jest pokazany wykres wysokości w zależności od czasu, a z prawej strony, wartość ciśnienia statycznego w czasie tego samego przejazdu.

Z racji przejazdu po równym terenie zmiany ciśnienia są niewielkie. Jedynie w połowie przejazdu można zauważyć gwałtowny uskok o wartości ok. 1,5 hPa. Uskok ten nastąpił na skutek szybkiego wjazdu na estakadę widoczną na wykresie wysokości z lewej strony (ok. 260 000 próbka).

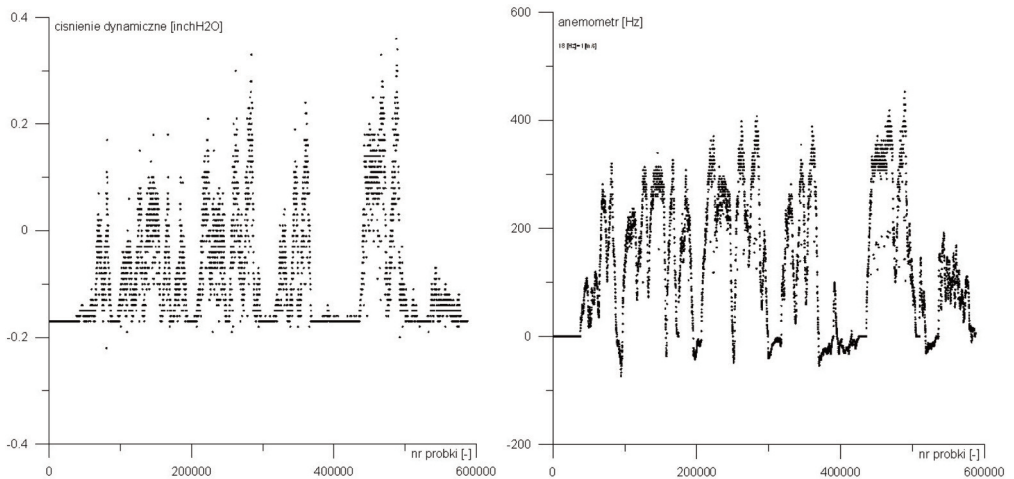
Interesujące jest porównanie wykresów na rysunku 16. Przedstawiają one pomiar prędkości liniowej mierzonej wzdłuż osi pojazdu za pomocą anemometru wiatraczkowego i rurki Prandtla. Korelacja jest widoczna gołym okiem. Istotna różnica pomiędzy tymi wykresami to pojawiające się w przebiegach z anemometrów podczas zatrzymań wartości ujemne prędkości. Wynikają one z wiatru i z cechy anemometru, który mierzy prędkości w obu kierunkach.



Rys. 14. Z lewej wykres kąta drogi w trakcie przejazdu, z prawej trajektoria w płaszczyźnie horyzontalnej



Rys. 15. Z lewej wykres wysokości nad poziomem morza (GPS), z prawej ciśnienie statyczne w czasie tego samego przejazdu



Rys. 16. Z lewej, zmierzone ciśnienie dynamiczne, z prawej prędkość względem powietrza zmierzona anemometrem wiatraczkowym (15 Hz = 1 m/s)

Wykonane pomiary i rejestracje wskazują na poprawne działanie układu. Cechą wyróżniającą pozytywnie jest mały pobór prądu podczas pracy układu pozwalający na długą pracę w warunkach zasilania autonomicznego z akumulatorów.

7. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i na naziemnym obiekcie ruchomym można stwierdzić:

1. Wykonany system pomiarowo - rejestrujący działa poprawnie i może być wykorzystany do badań na wiatrakowcu.
2. Badania na samochodzie potwierdziły prawidłowość pomiarów parametrów ruchu.

3. Wykonany system pomiarowo-rejestrujący może w pierwszej kolejności zostać wykorzystany do badań w locie podczas pierwszych lotów wiatrakowca. Szczególnie może okazać się przydatny przy weryfikacji aerodynamicznych modeli symulacyjnych wiatrakowca podczas wykonywania różnych manewrów.
4. Następnym etapem badań należy przeprowadzić na docelowym obiekcie, na wiatrakowcu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gałach A., Popowski S.: *Autonomiczny, przenośny układ pomiarowo – rejestrujący, przeznaczony do obsługiwanego procesu badań w locie*, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 202/2009.
- [2] Gremminger G.: *Height Velocity Curve for Gyroplanes*, Rotorcraft 2007.
- [3] Popowski S.: *Problem pomiaru małych prędkości ruchu obiektu względem powietrza*, Pomiary Automatyka Robotyka, nr 2/2009.
- [4] Yagmour K.: *Adaptive domain environment for operating systems*, <http://www.opersys.com/ftp/pub/Adeos/adeos.pdf>, 2001.

WITOLD DĄBROWSKI, STANISŁAW POPOWSKI, RADOŚLAW RYBANIEC

MEASURING AND DATA ACQUISITION SYSTEM FOR FLIGHT PARAMETERS OF AUTOGYRO

Abstract

In the article the system for measurement and data acquisition of flight parameters of autogyro is presented. The structure of the system, its functionality and operating principles of selected sensors are addressed in details. Results of selected laboratory tests of the system as well as results of tests conducted on moving platform – a car, are also presented. Several diagrams of recorded signals are added. Obtained, positive results allow for the next step of research: in-flight tests on board of autogyro.