

BEZPRZEWODOWY SYSTEM AKWIZYCJI DANYCH

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono koncepcję i opis budowy bezprzewodowego systemu pomiarowego. Wykorzystując transmisję bluetooth, zbudowano wieloczułnikowy system akwizycji, w którym każdy z modułów czujnikowych pracuje równolegle. Umożliwia to równoczesny pomiar wielu wielkości elektrycznych i nieelektrycznych w tym samym czasie. W artykule przedstawiono budowę szybkiego czujnika, implementację małego systemu operacyjnego sterującego jego pracą. Przedstawiono propozycję rozwiązania napotkanych przy budowie problemów z zakłóceniami i analizą danych. W module czujnikowym zaimplementowano system poleceń sterujących pracą modułu oraz przesyłający pobrane dane do jednostki zarządzającej. Przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych na systemie eksperymentów. Zbudowano aplikację analizującą i wizualizującą wyniki pomiarowe z czujnika przyspieszeń podłączonego do modułu. Przeprowadzono i omówiono również eksperyment badający równoległą transmisję z dwóch czujników pracujących na tym samym sygnale mierzonym.

Słowa kluczowe: pomiar przyspieszenia, LabView, PDA, CORTEX, moduł pomiarowy

WIRELESS DATA ACQUISITION SYSTEM

The article presents a concept and a description of the construction of a wireless measurement system based on the Bluetooth transmission. In which each of the sensing modules working in parallel. This allows simultaneous measurement of electrical and non-electrical quantities at the same time. The article presents: the construction of a measurement module, an implementation of a small operating system, controlling its work; proposal of solutions encountered in the construction of noise problems and data analysis. The sensing module implements the system of commands that control the module and transmits the retrieved data to the management unit. The results of measurements made on a system for experimentation. Analyzing the application was built and visualizing the results of measuring the acceleration sensor is connected to the module. Performed and discussed a parallel experiment examining transmission of the two sensors working on the same signal measured.

Keywords: acceleration measurement, LabView, PDA, CORTEX, DAQ

1. WSTĘP

Dla pomiarów na dużych obiektach zachodzi konieczność uruchomienia wieloczułnikowego rozproszonego systemu pomiarowego. Jest to powodowane kontrolą i sterowaniem opartym na dużej liczbie wielkości. W większości przypadków prowadzenie przewodów sygnałowych do każdego czujnika jest trudne lub niepożądane, zwłaszcza na obiektach z ruchomymi elementami, lub gdy odległości od czujników są znaczne. Same czujniki bezprzewodowe są droższe od konwencjonalnych przewodowych, jednak ze względu na koszty instalacji przewodowej – materiały i praca – korzystniejszym ekonomicznie rozwiązaniem jest instalacja bezprzewodowa. W przypadku takiego rozwiązania użytkownikowi dostarczane jest gotowe urządzenie, które często nie wymaga instalacji przez specjalistów z odpowiednim przeszkoleniem. Również rezygnacja z prowadzenia instalacji kablowych, zwłaszcza w miejscach wymagających przekuwania ścian czy prowadzenia dodatkowych rynienek kablowych, jest korzystnym rozwiązaniem.

Na podstawie podanych przesłanek opracowano koncepcję systemu pomiarowego z transmisją radiową. Wypracowa-

wano następujące założenia, które powinien spełnić ten system:

- System jest hierarchiczny, obsługuje wiele takich samych modułów czujników, które są względem siebie równorzędne. Wszystkie one podlegają jednostce bazowej (nadrzędnej), która odpowiada za prawidłową transmisję między nimi, zbierającej i magazynującej dane pomiarowe, możliwa jest też funkcja sterująca.
- Moduły czujnikowe są małe, łatwe w instalacji na obiekcie i tanie.
- Jednostka bazowa nie musi być wyposażona w dodatkowe przystawki elektroniczne w szczególności urządzenia typu karty pomiarowe.
- Moduł czujnikowy powinien być uniwersalny, umożliwia pomiar różnych wartości. Jego funkcjonalność powinna się opierać na koncepcji uniwersalnej miniaturowej i bezprzewodowej karty pomiarowej.
- Każdy z pojedynczych modułów czujnikowych powinien być niezależnie konfigurowalny, mieć możliwość pracy z różnym priorytecie i z różną prędkością transmisji danych. Powinien być możliwy jednoczesny pomiar wartości szybko lub wolno zmiennych, przy czym przepustowość całego systemu nie powinna być ograniczona.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Katedra Metrologii, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

Opierając się na tych założeniach zbudowano system, który składa się z pojedynczych modułów czujnikowych łączących się ze stacją bazową pobierającą dane. System ten jest opisany w tym artykule.

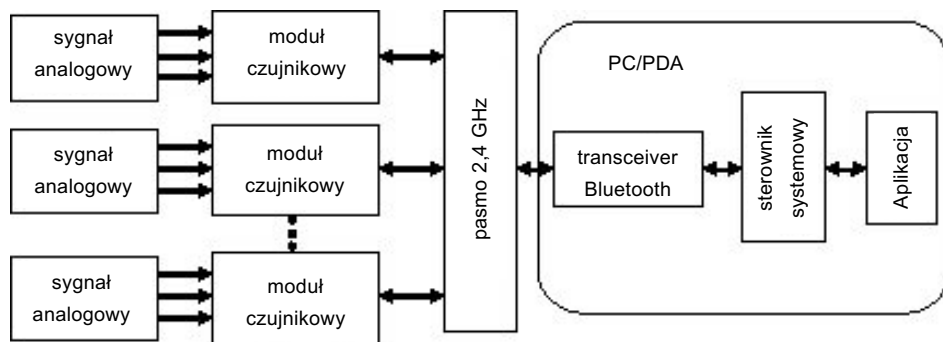
2. STRUKTURA SYSTEMU AKWIZYCJI DANYCH POMIAROWYCH

Struktura zbudowanego systemu opiera się na modułach czujnikowych. Każdy moduł wyposażony jest w trzy wejścia analogowe, z których sygnał jest próbkowany przetwornikiem A/C zintegrowanym z mikrokontrolerem i przesyłany bezprzewodowo do stacji bazowej. Do transmisji wykorzystano moduł bluetooth. Zarówno praca, jak i transmisja każdego z nich nadzorowane są przez stację bazową. Każdy z modułów wysyła dane jednocześnie, tak że możliwe jest równoczesne próbkowanie i konwersja z wszystkich dostępnych w systemie kanałów i z wszystkich czujników w tym samym czasie. Możliwa jest też praca z czujnikami pracującymi z różnym częstotliwością próbkowania, włączanie i wyłączanie poszczególnych modułów, oraz dynamiczna zmiana częstotliwości próbkowania. Strukturę fizyczną systemu przedstawia rysunek 1, natomiast rysunek 2 strukturę pojedynczego modułu.

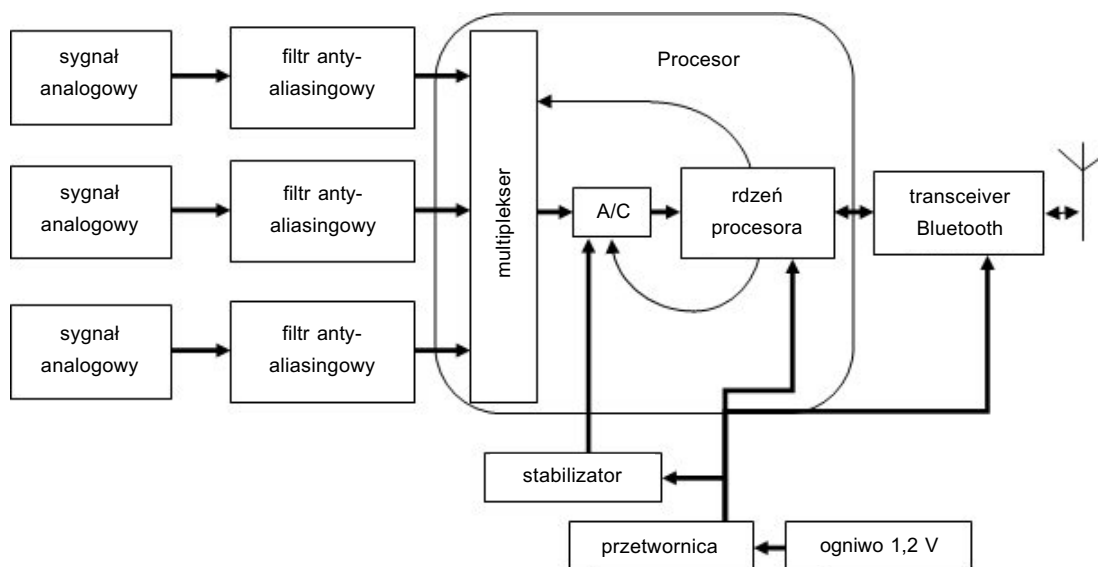
Elementem ograniczającym szybkość całej transmisji jest transceiver bluetooth [3] znajdujący się w module czujnikowym i stacji bazowej, jego prędkość przesyłania danych determinuje pracę całego systemu. Przepustowość jednego kanału – moduł stacja bazowa – wynosi 115 200 bps. Dane z wszystkich trzech przetworników jednego modułu przesyłane są w jednym komunikacie. Zastosowane przetworniki są 12-bitowe, tym samym najkrótszy komunikat przesyłający dane jest 5-bajtowy. Dla zapewnienia kontroli transmisji dodano dwa bajty terminujące komunikat. Przy takiej 7-bajtowej transmisji maksymalna częstotliwość próbkowania sygnału wynosi niecałe 2 kHz na każdy pojedynczy kanał.

Ponieważ zastosowany u układzie mikrokontroler ma przetwornik analogowo-cyfrowy pracujący z częstotliwością próbkowania 1 MHz, zastosowano wstępne przetwarzanie sygnału pomiarowego dla każdego wejścia analogowego.

Zbudowany system był oparty na stacji bazowej – komputer typu laptop z systemem Windows 7 lub PDA (*Personal Digital Assistant*), pod kontrolą Windows Mobile 6. Transceiver po stronie stacji bazowej dla obu rozwiązań pracował zgodnie z standardem Bluetooth 2.0 + EDR, który określa maksymalną przepustowość jako 3,1 Mbit/s.



Rys. 1. Struktura całego systemu

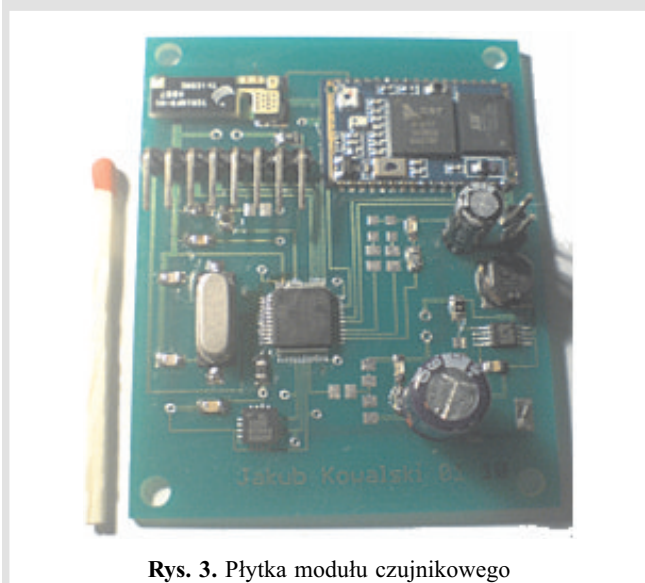


Rys. 2. Struktura modułu czujnikowego

Tym samym możliwe było zastosowanie maksymalnej liczby 7 modułów czujnikowych pracujących jednocześnie z maksymalną częstotliwością próbkowania [3].

3. STRUKTURA CZUJNIKA

Moduł czujnikowy składa się z procesora, modułu komunikacyjnego bluetooth i układu zasilania. Dodatkowo umieszczono na nim miejsce na czujnik przyspieszenia. Cały moduł czujnikowy może być zasilany z jednego albo z dwóch ogniw. Ze względu na znaczną energochłonność transceivera, zalecane jest użycie dwóch ogniw. Struktura modułu czujnikowego jest przedstawiona na rysunku 2. Wykonany moduł czujnikowy bez obudowy jest przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Płytkę modułu czujnikowego

Poza głównym zadaniem czujnika, tj. przesyłaniem danych w trybie online, istnieje możliwość zmiany szybkości próbkowania, uruchomienia określonej ilości pomiarów, oraz przesłania informacji o czujniku. Dane w przypadku transmisji bluetooth są przesyłane pakietami [3]. Program działający na module czujnikowym został tak skonfigurowany, by żadna z próbek nie została utracona.

4. WYBÓR PODSTAWOWYCH ELEMENTÓW MODUŁU

Jako główną jednostkę obliczeniową modułu czujnikowego zastosowano procesor z rodziny ARM Cortex 3. Procesor STM32F103 został wybrany ze względu na relatywnie szybkie 12-bitowe przetworniki analogowo-cyfrowe. Ma on dwa przetworniki pracujące z maksymalną szybkością 1 Msps. Można je podłączyć w pracę równoległą, uzyskując 2 Msps z pojedynczego kanału [9]. Dzięki zastosowaniu tego procesora uzyskano w miarę dobre parametry, jednocześnie wyeliminowano konieczność użycia zewnętrznego przetwornika, który podniósłby koszty oraz wielkość płytki. Mamy też do dyspozycji dużą moc obliczeniową

1,25 DMIPS. Dla celów testowych zbudowano moduł czujnikowy wyposażony w 3-osiowy czujnik przyspieszenia ADXL 330[6]. Całość została uzupełniona o przetwornicę impulsową umożliwiającą zasilanie modułu z pojedynczego ogniwa o napięciu 1,2 V [8].

Wszystkie zastosowane układy pracują z napięciem 3,3 V. Ze względu na założenie pracy z maksymalnie z dwoma ogniwami podłączonymi szeregowo, konieczne było zastosowanie impulsowej przetwornicy podwyższającej napięcie. Przy jej zastosowaniu moduł czujnikowy może pracować zasilany również z jednego odpowiedniego ogniwa. Z uwagi jednak na duży pobór prądu przez układ bluetooth, który może wynosić 80 mA, nie jest to korzystne. Cały moduł zasilany z jednego ogniwa pobiera maksymalnie prąd około 220 mA; średni prąd pobierany przez moduł czujnikowy to 140 mA. Dodatkowo powoduje to wzrost zakłóceń na części analogowej układu. By wyeliminować te zakłócenia, zastosowano separację masy analogowej i cyfrowej za pomocą dobrego dławika. Kolejną przebudową w zastosowanym układzie czujnika było zapewnienie stabilizacji napięcia analogowego. Zostało ono obniżone do 2,56 V za pomocą źródła referencyjnego TL 431 [2] podłączonego do pracy z najmniejszym napięciem. Opisane rozwiązania układowe obniżyły zakłócenia pochodzące od odbiornika bluetooth i przetwornicy zostały zminimalizowane.

5. KOMENDY STERUJĄCE PRACĄ MODUŁU

Głównym zastosowaniem czujnika jest wysyłanie danych. Jednak oprócz samego wysyłania moduł czujnikowy ma możliwość konfiguracji jego parametrów podczas pracy. Protokół transmisji jest wzorowany na komendach AT. Dzięki temu użytkownik modułu operuje na prostej i intuicyjnej składni poleceń. Polecenia zwrotne oraz komunikaty są przesyłane tak, że dysponując jedynie terminalem użytkownik, ma możliwość odczytania wyników czy skonfigurowania czujnika. Nie jest konieczne budowanie specjalnej aplikacji czy rozkodowywania danych.

Za pomocą komend możemy skonfigurować szybkość próbkowania, które z kanałów przetwornika będą przesyłane, odłączać czujnik, odczytać wersję oprogramowania, przysłać dane w trybie ciągłym oraz określoną ilość próbek.

Moduł czujnika jest odporny na zawieszenie transmisji. Zastosowano 7 maszyn stanów, które monitorują, czy bufor wejściowy nie jest przepełniony, komendy są dekodowane na bieżąco i w przypadku błędnego ciągu znaków (tj. niewyspecyfikowanego polecenia) jest on ignorowany. Gdy moduł czujnikowy znajduje się w stanie jałowym; podłączony do urządzenia typu master, ale nie wysyła danych, w odpowiedzi na błędny ciąg znakowy wysłana zostanie ramka błędu. W przypadku wysyłania danych błędny ciąg zostanie zignorowany. W budowie struktury nadawczo-odbiorczej użyto kilku typów przesyłanych danych, jakimi są: polecenie zdefiniowane – komenda; ciąg znakowy; i liczba

heksadecymalna. Korzystając z tej struktury istnieje szybka forma dodawania komend. W przypadku wysyłania danych zastosowano implementację monitorującą główną część programu.

6. APLIKACJA MODUŁU CZUJNIKOWEGO Z CZUJNIKIEM PRZYSPIESZEŃ

Aplikację czujnika zaprojektowano, podkreślając warstwowość kodu. Zastosowano 3 warstwy, które operują na strukturach. Najniższa z nich operuje bezpośrednio na rejestrach, żadna z wyższych warstw programu nie ma do niego dostępu. Druga definiuje ogólne zależności pomiędzy strukturami i ich działaniem. Trzecia nadaje zaś właściwą funkcjonalność modułowi. Napisano tym samym kod, który łatwo zaadaptować do innych celów. Łatwo zmienić w nim procesor oraz funkcjonalność, korzystając cały czas z napisanego wcześniej kodu.

Główny program modułu pomiarowego pracuje niezależnie od transmisji, nieprawidłowe polecenia konfiguracyjne nie opóźniają ani nie zakłócają przetwarzania danych. W przypadku wysyłania danych zastosowano dwa tryby różniące się implementacją wewnętrzną. Rozdzielenie na te tryby jest związane z optymalizacją szybkości wysyłania danych w przypadku transmisji ciągłej, która z założenia będzie używana częściej. Transmisja ciągła realizowana jest z wykorzystaniem kanału DMA przetwornika A/C oraz kanału DMA UART-a, w przypadku transmisji określonej ilości próbek, używany jest kanał DMA przetwornika natomiast wysyłanie danych odbywa się tylko z użyciem przerwania pochodzącego od pustego bufora nadawczego UART-a. Tym zabiegiem uzyskano zarówno podniesienie szybkości transmisji jak i dużo większą przejrzystość kodu.

Aplikacja działająca na module czujnika została oparta w całości na 7 maszynach stanów, dzięki temu program staje się przejrzysty oraz istnieje prosta możliwość rozwoju aplikacji o dodatkowe komendy czy funkcjonalności bez konieczności przebudowywania całości aplikacji. W oprogramowaniu czujnika zastosowano kilka uniwersalnych struktur danych, które w przypadku odbioru rozkazów i wysyłania danych rozwiązują konflikty z dostępem do zasobów. Dodatkowo aplikacja stała się odporna na błędnie podane dane.

7. PRACA CAŁEGO SYSTEMU

Praca systemu jest zarządzana za pomocą stacji bazowej. Przy transmisji bluetooth nie jest zastosowana emulacja portu szeregowego, co często jest wykorzystywane jako najprostsze rozwiązanie problemu transmisji. W tym systemie połączono się bezpośrednio z driverem systemowym bluetootha. Dzięki temu zabiegowi istnieje możliwość połączenia się maksymalnie z siedmioma odbiornikami czujnikowymi. Aplikacja dla stacji bazowej pracuje w środowi-

sku LabView, została ona napisana jako wielowątkowa. Każdy z pracujących w systemie modułów czujnikowych ma w niej własny wątek akwizycji i analizy, dzięki temu akwizycja poszczególnych czujników nie blokuje się wzajemnie. Nie powstaje sytuacja, że jeden z czujników nadający z maksymalną prędkością blokuje drugi czujnik nadający mniejszą liczbę próbek.

8. POMIARY

Do przedstawienia systemu zostały zbudowane dwa testowe systemy pomiarowe. Pierwszy z nich operuje na jednym module czujnikowym pracującym z podłączonym do niego 3-osiowym czujnikiem przyspieszenia ADXL. Jego sygnałem wyjściowym są 3 napięcia analogowe – adekwatne do zarejestrowanych przyspieszeń w 3 osiach czujnika. Struktura modułu jest przedstawiona na rysunku 4.

Czujnik przyspieszenia podłączono do trzech wejść analogowych. Moduł ustawiony został na pomiar z trzech kanałów analogowych, efektywna częstotliwość próbkowania 500 Hz na kanał. Dane zostały przesłane do aplikacji na urządzeniu PDA z Windows Mobile 6, gdzie program zarządzający transmisją kolejkował dane, a następnie zostały one zapisane na karcie SD.

Wynik pomiaru przedstawia rysunek 5.

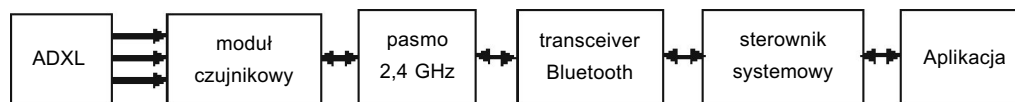
Wynik pomiaru obrazuje przyspieszenie w trzech osiach czujnika. Podczas pomiaru zmieniano płaszczyznę czujnika względem ziemi, przez to oddziaływało na niego zmienne przyspieszenie ziemskie. Ze względu na powolny ruch czujnika wartości obserwowanego przyspieszenia są ułamkami przyspieszenia ziemskiego. Zastosowany czujnik przyspieszenia ma zakres $\pm 3g$ i pracuje z napięciem zasilania 3,3 V. Widoczne zaburzenia sygnału pochodzą z uproszczonego sposobu podpięcia czujnika przyspieszeń do mikrokontrolera, brak filtrów analogowych.

Napisana została aplikacja na stację bazową. Aplikacja pobierała sygnał z pojedynczego czujnika i przeprowadzała filtrację oraz na podstawie 3 sygnałów z czujnika przyspieszenia powielała ruch modułu względem ziemi na renderowany model samolotu na ekranie komputera. Otrzymano funkcjonalność bezprzewodowego pilota do „latającego” na ekranie samolotu.

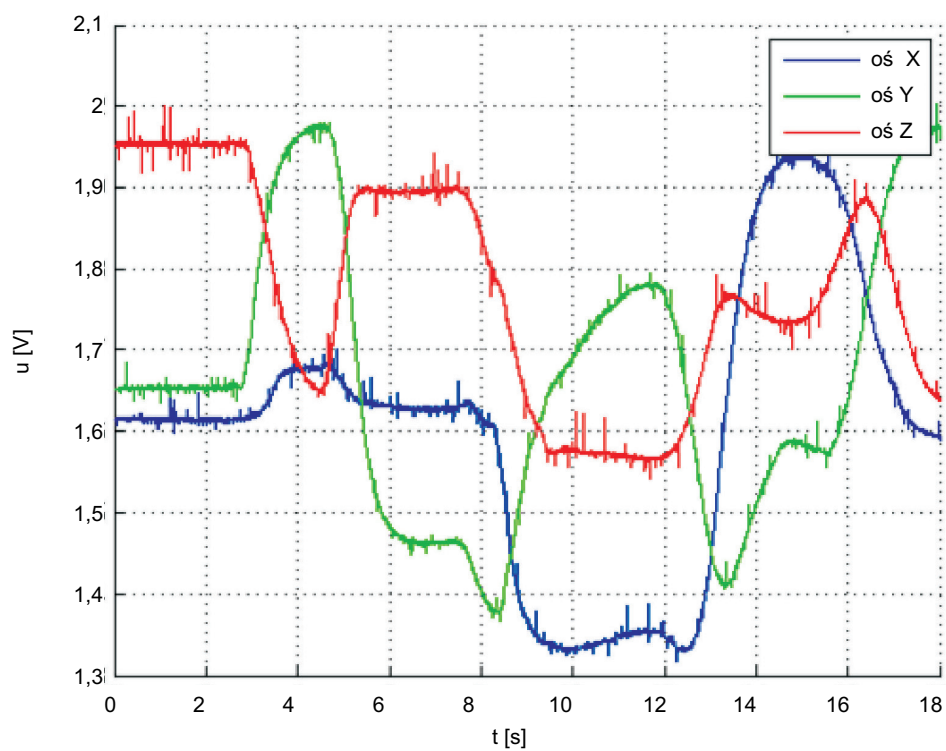
Rysunek 6 przedstawia wykonany eksperyment. Na ekranie monitora komputera widać renderowany samolot który ustawia się względem dołu monitora tak samo jak moduł czujnikowy – po prawej. Kąt jego pochylenia względem każdej z płaszczyzn jest taki sam jak odpowiadający kąt pochylenia modułu czujnikowego.

Drugi z pomiarów odbywał się przy wykorzystaniu dwóch modułów pracujących równolegle.

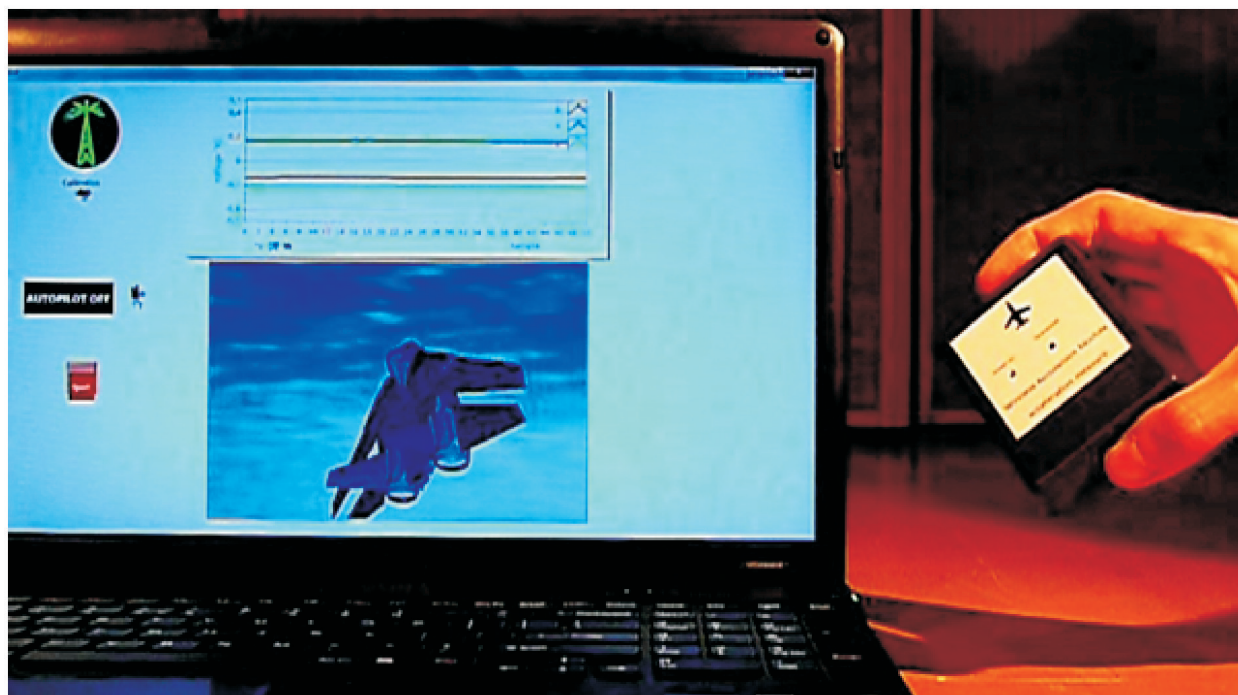
Do wejść analogowych obu z nich dołączony został jeden generator. Aplikacja została uruchomiona na laptopie z Windows 7. Schemat eksperymentu przedstawia rysunek 7.



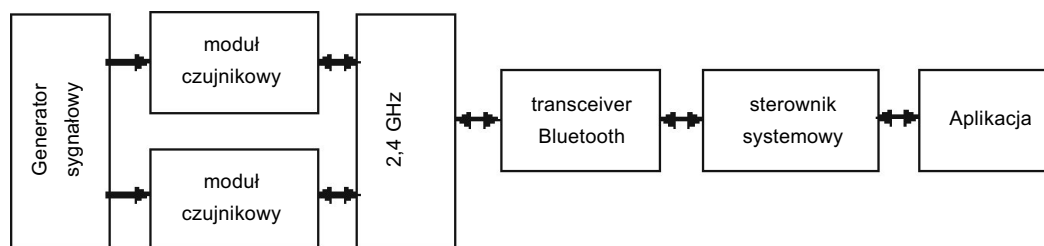
Rys. 4. Struktura pierwszego eksperymentu



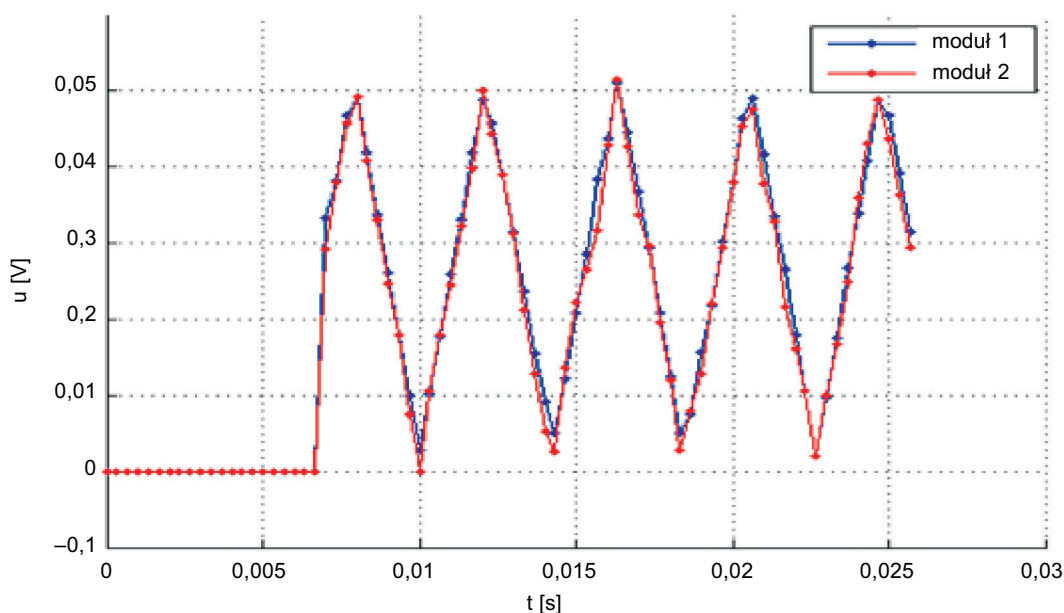
Rys. 5. Przykładowa rejestracja sygnałów dla czujnika przyspieszeń



Rys. 6. Działanie systemu z czujnikiem przyspieszenia



Rys. 7. Struktura drugiego eksperymentu



Rys. 8. Przykładowa rejestracja sygnałów dla dwóch modułów

Moduły czujnikowe pracowały w trybie ciągłym z prędkością próbkowania wynoszącą 3 kHz. W tej aplikacji każdy z modułów czujnikowych przetwarzał tylko jeden kanał. Z generatora podano sygnał trójkątny o amplitudzie 0,25 V i składowej stałej 0,25 V, o częstotliwości 240 Hz. Wyniki pomiaru przedstawia na rysunek 8.

Sygnal przedstawia moment włączenia generatora do pracy. Orz kilka pierwszych okresów sygnału.

Obie rejestracje sygnałów są zgodne z oczekiwaniami i pokazują poprawną pracę zbudowanego systemu. Praca systemu po stronie cyfrowej jest poprawna, natomiast występujące różnice w sygnałach na rysunku 8 pokazują na niejednakową pracę części analogowej obu modułów czujnikowych.

9. ZAKOŃCZENIE

Opisany system pomiarowy z transmisją radiową podczas eksperymentów pracował poprawnie, tj. zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi. Moduł czujnikowy wyposażony w dodatkowe obwody wejściowe można użyć praktycznie do pomiaru dowolnych wielkości. Ograniczeniem możli-

wości pracy modułu jest otoczenie i jego wpływ na transmisję radiową. Należy też zadbać o odpowiednią jakość zasilania, ponieważ jedną z przyczyn występowania zakłóceń impulsowych w przykładzie (rys. 4) było właśnie zasilanie czujników. Zdaniem autora system składający się z siedmiu modułów czujnikowych – ograniczenia transmisji bluetooth – i odległości do 10 m od stacji bazowej – moc używanych nadajników – jest w stanie obsłużyć transmisję online jednocześnie z nich wszystkich, przy częstotliwości próbkowania do 500 Hz. Istnienie możliwość szybkiej adaptacji systemu czujników do zastosowań mobilnych.

Podziękowania

Autor chce serdecznie podziękować dr. inż. Piotrowi Majowi oraz dr. hab. inż. Andrzejowi Bieniowi prof. AGH za merytoryczne uwagi przy budowie systemu oraz opiekę naukową nad projektem.

Literatura

- [1] Bryndza L.: *Mikrokontrolery z rdzeniem ARM9 w przykładach*. BTC, Legionowo 2009

- [2] Horowitz P., Hill W.: *Sztuka elektroniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006
- [3] Miller B., Bisdikian C.: *Bluetooth uwolnij się od kabli*. Helion, 2003
- [4] Paprocki K.: *Mikrokontrolery STM32 w praktyce*. BTC, Legionowo 2009
- [5] Zieliński T.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*. Od teorii do zastosowań, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007
- [6] Nota Katalogowa, ADXL 330, Analog Devices, 2007
- [7] Nota Katalogowa, BTM 112, Rayson
- [8] Nota Katalogowa, L6920, STMicroelectronics, 2005
- [9] Nota Katalogowa, STM32F103x6 STM32F103x8 STM32F103xB, STMicroelectronics, 2008
- [10] Przykładowe programy z pakietu LabView 2009

Wpłynęło: 16.12.2010



Jakub KOWALSKI

Jakub Kowalski ukończył kierunek elektrotechnika w specjalności automatyka i metrologia na Wydziale Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Obecnie pracuje na katedrze Metrologii AGH. Specjalizuje się w budowie aparatury dedykowanej do pomiarów w energetyce oraz cyfrowym przetwarzaniem sygnałów.

e-mail: kowjak@agh.edu.pl