

Grzegorz BŁAD¹, Anna SZLACHTA²¹ POLITECHNIKA RZESZOWSKA, ZAKŁAD SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH I TELEKOMUNIKACYJNYCH, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów² POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW DIAGNOSTYCZNYCH, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

Zastosowanie układów MEMS w pomiarach położenia oraz parametrów ruchu liniowego

Dr inż. Grzegorz BŁAD

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Rzeszowskiej – specjalność automatyka i metrologia (1994). W 2006 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych, w dyscyplinie naukowej elektrotechnika, specjalność układy hybrydowe. Adiunkt w Zakładzie Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Obszarami zainteresowania są m.in. mikro- i nanotechnologia wytwarzania struktur elektronicznych (MEMS) oraz modelowanie w/w urządzeń w aspekcie termicznym.



e-mail: gblad@prz.edu.pl

Dr inż. Anna SZLACHTA

Absolwentka Wydziału Elektrycznego Politechniki Rzeszowskiej – specjalność aparatura elektroniczna (1995). W 2006 r. uzyskała stopień doktora nauk technicznych, w dyscyplinie naukowej elektrotechnika, specjalność metrologia elektryczna i elektroniczna. Adiunkt w Katedrze Metrologii i Systemów Diagnostycznych na Wydziale Elektro-techniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się zagadnieniami przetwarzania i analizy sygnałów pomiarowych.



e-mail: annasz@prz.edu.pl

Streszczenie

W artykule zostało przedstawione opracowanie systemu do pomiaru położenia oraz wyznaczenia parametrów ruchu liniowego poruszających się obiektów z wykorzystaniem czujnika MEMS. System w konfiguracji INS (ang. *Inertial Navigation System*), jest systemem nawigacji bezwładnościowej, wykorzystuje czujniki, takie jak akcelerometry, żyroskopy i inklinometry do obliczania prędkości, drogi i położenia poruszającego się obiektu. Układ składa się z części sprzętowej dotyczącej m.in. komunikacji mikrokontrolera z czujnikiem przyspieszenia oraz komputerem, a także interfejsu użytkownika opracowanego w środowisku LabVIEW, który posłużył do prezentacji i obróbki wyników pomiarów.

Słowa kluczowe: MEMS; akcelerometr, pomiar położenia.

Application of MEMS systems in measurements of position and motion parameters

Abstract

The elaborated system for measurement of position and linear motion parameters using MEMS sensor has been presented in this paper. The idea of measuring system has been described in chapter 2. The system's block diagram is illustrated in Fig. 1. Such system consists of hardware and calculation unit part. Data from sensor ADXL345 (Fig. 3) are transmitted to PC computer using Atmega32 microcontroller. The graphic user interface has been made in LabVIEW environment. It allows to present and data handling. The distance and velocity are calculate (in LabVIEW) based on acceleration values obtained from ADXL345 sensor. The practical application was presented in chapter 3 (Fig. 4). The example results of investigations have been shown and discussed in another part of work (Fig. 5). The designed and practically made measuring system has possibility of expanding with other sensors up to full INS system (Inertial Navigation System). It only requires software modification (without hardware interference).

Keywords: MEMS, accelerometer, position measurement, motion parameters.

1. Wstęp

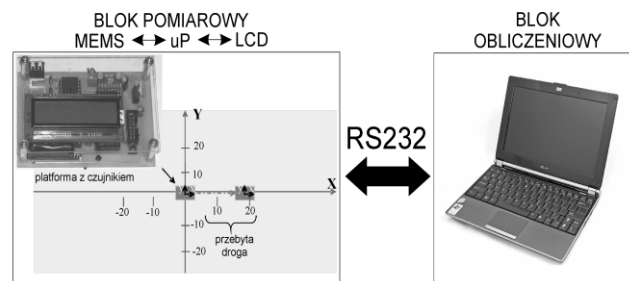
W ostatnich latach nastąpił ogromny postęp w dziedzinie konstrukcji czujników. Obecnie wkraczają one we wszystkie dziedziny automatyki. Ten znaczący postęp technologiczny wiąże się z faktem udostępnienia do powszechnego wykorzystania technologii opracowanych w trakcie realizacji skomplikowanych badań programów kosmicznych. Powstanie miniaturowych czujników było możliwe w wyniku rozwoju dwóch nowych gałęzi techniki: mikrosystemów elektro-mechanicznych oraz nanotechnologii. MEMS (ang. *Micro-Electro-Mechanical Systems*, znane jest też takie określenie jak MST, ang. *Micro-Electro-Mechanical Systems*), inaczej nazywane również mikrosystemami są to miniaturowe urządzenia elektro-mechaniczne przetwarzające różne wielkości mechaniczne, termiczne, chemiczne na sygnały elektryczne i odwrotnie. Zastosowanie tego typu elementów pozwala

na budowę różnych czujników MEMS, które zastępują tradycyjne czujniki stosowane w przemyśle samochodowym, technice informatycznej czy też w zastosowaniach biomedycznych. Umieszczenie elementów mechanicznych i elektronicznych w jednym miniaturowym układzie scalonym daje wiele istotnych korzyści związanych nie tylko z samą miniaturyzacją elektroniki, ale pozwala także budować o wiele szybsze układy mechaniczne. MEMS-y są odporne na zmiany temperatury i towarzyszące im wibracje elementów mechanicznych, na które są wrażliwe tradycyjne czujniki mechaniczne. Kolejną zaletą jest możliwość wykorzystania tych samych technologii, które są stosowane podczas produkcji scalonych układów elektronicznych. Prowadzi to do ograniczenia całkowitych kosztów wytwarzania układów MEMS [1, 2, 3, 4].

2. Koncepcja systemu pomiarowego

Jednym z najczęściej stosowanych MEMS-ów do pomiaru parametrów ruchu liniowego dowolnego obiektu jest akcelerometr.

Możliwość pomiaru przyspieszenia pozwala na stosowanie tego typu układów do pomiaru również takich parametrów jak np. nachylenie, drgania, czy wielkości opisujące ruch liniowy i obrotowy.



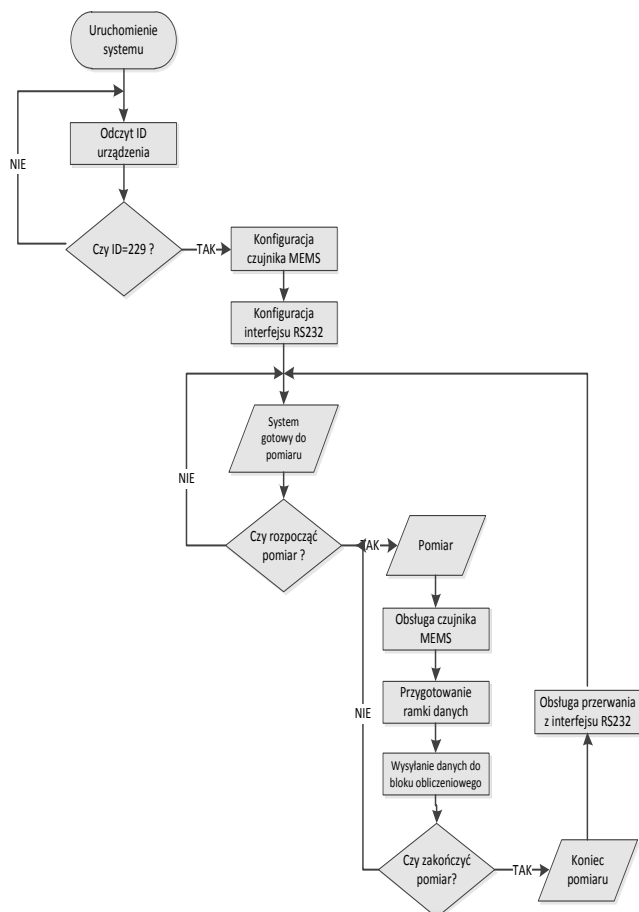
Rys. 1. Schemat blokowy systemu
Fig. 1. The block diagram of the system

Opracowany system składa się z bloku pomiarowego i obliczeniowego (rys.1). Blok obliczeniowy stanowi komputer PC, który komunikuje się z blokiem pomiarowym za pomocą interfejsu RS232.

Komputer jest jednostką zarządzającą całym systemem. Odbiera on sygnały z jednostki IMU (ang. *Inertial Measurement Unit*) i na podstawie opracowanego oprogramowania wyznacza na bieżąco pozycję obiektu. Głównymi podzespołami bloku pomiarowego są: akcelerometr, mikroprocesor oraz wyświetlacz LCD. Czujnik przyspieszenia rejestruje zmianę przyspieszenia obiektu wzdłuż 2 osi. W zależności od tego jak zostanie zorientowany w przestrzeni, może określać przyspieszenie w płaszczyźnie xy , xz , yz .

Czujnik pomiarowy MEMS jest obsługiwany przez mikroprocesor Atmega32. Jednostka centralna bloku pomiarowego, odpowiedzialna jest za przesyłanie danych pomiarowych do komputera oraz realizację zadań zleconych przez użytkownika obsługującego system z poziomu komputera. Układ wyposażony jest w wyświetlacz LCD, na którym przedstawiane są podstawowe parametry dotyczące procesu pomiarowego oraz poprawności pracy całego systemu. Algorytm sterowania pracą mikrokontrolera został przedstawiony na rysunku 2.

Urządzenie zaprojektowano tak, aby mogło być wyposażone w czujnik do pomiaru prędkości obrotowej, który pozwoli rozbudować je do kompletnego systemu INS umożliwiającego wyznaczenie położenia obiektu w przestrzeni. Zaprojektowany system spełnia swoją rolę w przypadku przemieszczania się po płaszczyźnie prostopadłej do działania linii sił pola grawitacyjnego. Wykonany model systemu umożliwia: rejestrację zmian przyspieszenia obiektu poruszającego się na płaszczyźnie; określenie wykresu prędkości poruszającego się obiektu; pozwala określić drogę przebytą przez platformę mobilną; umożliwia określenie pozycji obiektu na płaszczyźnie względem punktu odniesienia; pozwala rejestrować wyniki pomiarów do pliku w celu ich analizy w programach matematycznych; środowisko programowe jest dostępne dla użytkownika z poziomu komputera i pozwala na zmianę określonych parametrów pomiaru. Blok pomiarowy zaprojektowano tak, aby umożliwić jego rozbudowę o kolejne czujniki pomiarowe.

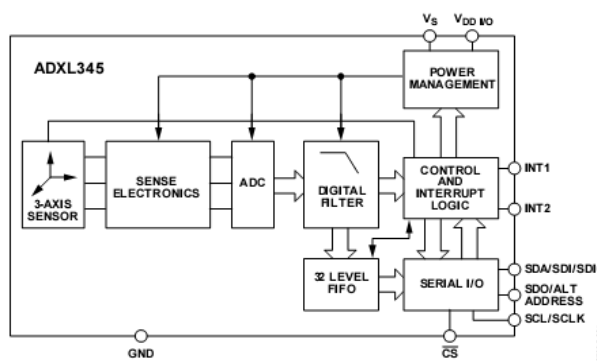


Rys. 2. Algorytm sterujący pracą mikrokontrolera [5]
Fig. 2. The algorithm of microcontroller [5]

Zbudowany układ został wyposażony w prosty interfejs obsługi zapewniający łatwość pomiaru i obserwacji parametrów opisujących linowy ruch obiektów. Interfejs użytkownika został wykonany w środowisku LabVIEW, natomiast oprogramowanie mikroprocesora zostało napisane w języku C.

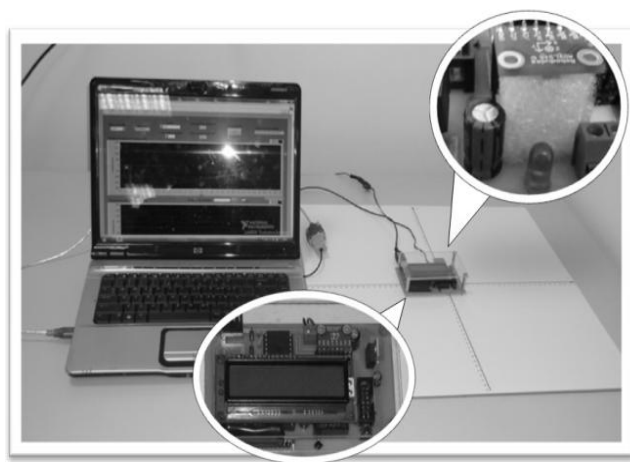
3. Konstrukcja systemu

W opracowanym na Politechnice Rzeszowskiej systemie został użyty 3 osiowy akcelerometr ADXL345. Jest to precyzyjny cyfrowy 3 osiowy akcelerometr firmy Analog Devices wykonany w technologii MEMS, o zakresie działania od $\pm 2g$ do $\pm 16g$ umieszczony w obudowie LGA14 o wymiarach $3 \times 5 \times 1$ mm. Obsługuje on cyfrowe interfejsy I2C i SPI wspierane sprzętowo praktycznie przez każdy nowoczesny mikrokontroler. Czujnik ten doskonale nadaje się do urządzeń mobilnych. Mierzy on statyczne przyspieszenie ziemskie w aplikacjach służących do wykrywania przechyłu, jak również dynamiczne przyspieszenie wynikające z ruchu lub wstrząsu. Wysoka rozdzielczość ($0,0039$ g/LSB) umożliwia pomiar zmian nachylenia mniejszych niż $1,0^\circ$. Charakteryzuje się niezwykle małym poborem prądu, jak na tę klasę układów, wynoszącym już od $25 \mu A$. Następną cechą wyróżniającą ADXL345 na tle innych czujników przyspieszenia jest możliwość płynnej regulacji szybkości wyprowadzania danych w zakresie od $0,1$ Hz do $3,2$ kHz; w innych układach szybkość ta jest zazwyczaj stała i wynosi 100 Hz, 400 Hz lub 1 kHz. Pozwala to zmniejszyć pobór mocy do wymaganego minimum. Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy zastosowanego czujnika MEMS [12].



Rys. 3. Schemat mikromechanicznego czujnika ADXL345 [8]
Fig. 3. Block diagram of Micro-Electro-Mechanical sensor ADXL345 [8]

Płytkę została przygotowana pod kątem zaimplementowania dodatkowych czujników, oferowanych przez firmę Analog Devices i sprzedawanych jako gotowe moduły przez firmę Robodudes. Jest to obecnie jedna z najlepszych opcji zakupu czujnika MEMS. Blok IMU6DOF jest złączem IDC10 przygotowanym pod układ IMU6DOF zawierający akcelerometr oraz żyroskop, zintegrowane na jednej płytce. Dodatkowo możliwe jest zamontowanie oddzielnego układu żyroskopu. Do zarządzania blokiem pomiarowym użyto mikrokontrolera Atmega32L. Komunikacja pomiędzy mikrokontrolerem a czujnikiem MEMS odbywa się przy użyciu magistrali SPI. Przesyłanie danych wykonuje się przy wykorzystaniu 4 linii sygnałowych MISO, MOSI, SCL, /SS. Mikrokontroler programowany jest poprzez interfejs SPI. Aby możliwa była obsługa czujników MEMS jak i programowanie mikrokontrolera zastosowano układ 74HC4053. Rozwiązanie takie jest stosowane w systemach, w których do magistrali SPI podłączone są inne układy w tym przypadku czujnik MEMS. Eliminuje ono możliwość przypadkowego zapisu do tych układów w czasie programowania mikrokontrolera. Rozwiązanie to pozwala również na programowanie procesora w systemie, bez konieczności demontażu płytki i przenoszenia do programatora. Złącze JP3 jest kompatybilne ze standardem 10-wyprowadzeniowym firmy Atmel. Zbudowane urządzenie zostało wyposażone również w wyświetlacz LCD. Alfanumeryczny wyświetlacz LCD wykorzystany jest do obrazowania różnego rodzaju informacji związanych ze stanem pracy układu. Zdjęcie systemu do wyznaczenia położenia, przyspieszenia, wraz ze specjalną podkładką przedstawia rysunek 4.

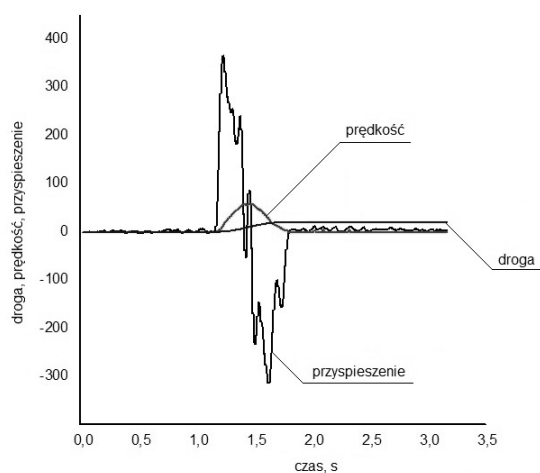


Rys. 4. System do pomiaru położenia na płaszczyźnie
Fig. 4. The system for position measurement

Współpraca bloku pomiarowego z blokiem obliczeniowym odbywa się przy wykorzystaniu magistrali RS232. Podłączenie pinów 14 i 15, które są wyprowadzeniami linii RXD i TXD do złącza DB9 wymaga konwersji napięć ze standardu RS232 (+15 V, -15 V) do poziomu napięć TTL (+5 V). Jako konwerter napięć zastosowano układ Max3232, który dzięki wbudowanym pompom ładunkowym wytwarza wymagane przez standard RS232 poziomy napięcie.

4. Testy i pomiary

W celu sprawdzenia poprawności pracy wykonanego systemu INS przetestowano i przeanalizowano działanie wszystkich jego podzespołów łącznie z analizą algorytmu sterowania. Dokonano również przykładowych pomiarów w celu prezentacji możliwości wykonanego stanowiska oraz analizy uzyskanych wyników. Podczas wielokrotnych prób wyznaczania położenia przesuwanej po przygotowanej makięcie platformie mobilnej z czujnikiem MEMS, nie stwierdzono większych błędów konstrukcyjnych. Potwierdza to poprawność pracy systemu inercyjnego.



Rys. 5. Wyniki przykładowych pomiarów
Fig. 5. The example results of measurements

Do wyznaczenia z przyspieszenia wartości prędkości i przemieszczenia należało zastosować algorytm dwukrotnego całkowania [6]. W opracowaniu zastosowano pewne modyfikacje programowe jak i sprzętowe. W niniejszym opracowaniu w celu wyzna-

czenia parametrów ruchu liniowego do całkowania wykorzystano metodę trapezów [7].

Wykresy określające przyspieszenie układu, jego prędkość oraz drogę nałożono na siebie (rys. 5) - zamieszczono na wspólnym wykresie (jednej skali). Pozwala to dokładniej opisać ruchu obiektu. Od chwili czasu równej 1 s układ zaczął przyspieszać, następnie w 1,22 s uzyskał maksymalne przyspieszenie, które następnie malało, aż do czasu 1,68 s gdzie układ zatrzymał się. Przedstawiony wykres prędkości osiąga swoje maksimum w chwili czasu równej 1,5 s (układ w tym czasie zanotował już maksymalne przyspieszenie i zaczął hamować). W chwili czasu 1,7 sekundy (po zatrzymaniu platformy z czujnikiem) odczytano przebytą przez niego drogę.

Pomimo zastosowanych rozwiązań sprzętowych i programowych nie można całkowicie wyeliminować obecnych podczas przemieszczania platformy zakłóceń, czy drgań, które pogarszają precyzję pomiarów.

5. Wnioski

Zaprojektowane rozwiązanie konstrukcyjne bloku obliczeniowego pozwala na wyposażenie w przyszłości wykonanego systemu w układ dodatkowych czujników np. żyroskopu. W przypadku rozbudowania systemu o czujnik obrotu stałby się on kompletnym systemem INS pozwalając jednocześnie na lokalizację obiektu w przestrzeni. W przypadku rozbudowania systemu o żyroskop należałoby zaimplementować w pakiecie LabVIEW filtr Kalmana, który znacząco poprawia działanie układów nawigacji inercyjnej. Dzięki możliwości łatwej wymiany programu sterującego mikroprocesorem i zarządzającego blokiem pomiarowym (program w pamięci EEPROM z programowaniem w systemie) istnieje możliwość rozbudowania go o dodatkowe urządzenie peryferyjne. Modyfikacja oprogramowania bloku pomiarowego jest możliwa z poziomu LabVIEW bez konieczności zmiany oprogramowania mikrokontrolera. Rozwiązanie sprzętowe jest przygotowane pod kilka typów czujników i w przypadku rozbudowania układu pod tym kątem konieczna będzie jedynie modyfikacja istniejącego oprogramowania (bez ingerencji w część sprzętową, gdzie czujnik zostanie jedynie włączony w odpowiednim złączu).

6. Literatura

- [1] Gućma M., Montewka J.: Podstawy morskiej nawigacji inercyjnej. Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2006.
- [2] Kempe V.: Inertial MEMS: principles and practice. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2011.
- [3] Maluf N.: An introduction to Micromechanical Systems Engineering. Artech house, Boston-London.
- [4] Uradziński M.: Technologia MEMS w nawigacji i monitoringu pojazdów. PAK 2007, nr 11, s. 50-52.
- [5] Małecki B.: Układy MEMS w pomiarach położenia oraz parametrów ruchu liniowego. Politechnika Rzeszowska Wydział Elektrotechniki i Informatyki. Praca dyplomowa magisterska, Rzeszów 2011.
- [6] Sawicki M., Sondej T.: Zastosowanie niskokosztowych sensorów MEMS w systemach nawigacji inercyjnej. Materiały VIII Konferencji Naukowo- Technicznej PPM'11, str. 146-150.
- [7] Kędzierski J., Ostrowski E.: Proste metody obsługi akcelerometrów - zastosowanie w robotach mobilnych na przykładzie ADXL202 oraz MMA7260. Raport koła naukowego robotyków „KoNaR” 2007.
- [8] Dokumentacja techniczno-eksploatacyjna układu ADXL345.

otrzymano / received: 08.09.2011
przyjęto do druku / accepted: 02.11.2011

artykuł recenzowany