

Mateusz MARKIEFKA¹

Opiekun naukowy: Jacek RYSIŃSKI²

UKŁADY POMIAROWE W TECHNOLOGII MEMS

Streszczenie: W pracy przedstawione zostały dwa czujniki wykonane w technologii MEMS. Inklinometr dynamiczny TMM88-PCI090 firmy SICK do zastosowań w przemyśle oraz układ AltIMU-10 V5 firmy Pololu, jako układ elektroniki hobbystycznej. Układy te zostały porównane pod kątem mechanicznym, elektrycznym, wydajnościowym oraz łatwości obsługi.

Słowa kluczowe: układ pomiarowy, akcelerometr, żyroskop, inklino­metr dynamiczny, obliczenia, mikrokontroler, PLC, projekt

MEASUREMENT SYSTEMS IN MEMS TECHNOLOGY

Summary: The paper presents two sensors made in the MEMS technology. Dynamic inclinometer TMM99-PCI090 by SICK for industrial applications and the AltIMU-10 V5 system by Pololu, as a hobby electronics system. These systems were compared in terms of mechanical, electrical, performance and ease of use.

Keywords: measuring system, accelerometer, gyroscope, dynamic inclinometer, calculations, microcontroller, PLC, project

1. Wprowadzenie

Jednym z wielu pomiarów wykonywanych w celu zapewnienia odpowiedniej kontroli w systemach sterowania jest pomiar aktualnego kąta nachylenia urządzenia. Dzięki monitorowaniu kątów nachylenia bądź wychylenia, w każdej chwili można znacząco poprawić bezpieczeństwo pracy poruszającej się maszyny, zwiększyć efektywność jej pracy lub nawet ją przyspieszyć. Najczęściej wykorzystywanym do tego urządzeniem są inklino­metry dynamiczne.

Znajdują one zastosowanie w różnorodnych systemach sterowania:

¹ mgr inż. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Interdyscyplinarna Szkoła Doktorska, Inżynieria Mechaniczna, email: mmarkiefka4@gmail.com

² dr inż. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, email: jrysinski@ad.ath.bielsko.pl

- w samochodach specjalnych sygnalizujących za duży kąt nachylenia na zakręcie, który może spowodować przewrócenie się wozu,
- w dźwigach lub wózkach jezdniowych podnośnikowych monitorujące ich nachylenie w trakcie przenoszenia materiałów o znacznej masie,
- w odnawialnych źródłach energii np. farmach fotowoltaicznych, gdzie system automatycznie ustawia panele pod odpowiednim kątem w stosunku do słońca,
- w medycynie przy tomografii komputerowej.

Obecnie spotykamy się z bardzo dużą dostępnością czujników oferowanych przez wielu producentów, które często wydają się na pierwszy rzut oka takie same. Należy jednak dokładnie zapoznać się ze specyfikacją, aby zdecydować, czy dany czujnik będzie spełniał nasze wymagania. Kolejnym aspektem przy wyborze czujnika jest jego cena. Oczywiście jeżeli dany czujnik jest niezbędny do realizacji założonego celu to jest to koszt, z którym projektant musi się liczyć, jednak zawsze pozostaje pytanie czy nie udałoby się tego zrobić taniej.

W następnych rozdziałach zostały porównane dwa układy pomiaru nachylenia. Pierwszy z nich to układ AltIMU-10 5V, składający się z akcelerometru, żyroskopu, barometru i magnetometru, który został wykorzystany przy autorskim projekcie układu pomiarowego. Drugi to inklinometr dynamiczny TMM88-PCI090 firmy SICK z gotowym interfejsem komunikacyjnym.

2. Autorski układ pomiarowy

Układ pomiarowy składa się z czterech elementów:

- płytki Arduino Rev 3,
- nakładki rozszerzającej Ethernet Shield V2,
- czujnika AltIMU-10 5V,
- wydrukowanej w technice druku 3D obudowie.

2.1. Arduino Uno

Płytką elektroniczną o nazwie Arduino Uno, jest to płytką zawierająca 8-bitowy mikrokontroler AVR ATmega328p, którego piny zostały wyprowadzone na złącza, umożliwiające ich łatwe i szybkie wykorzystanie. Płytką jest wykonana w taki sposób, że nie trzeba dodawać żadnych dodatkowych elementów elektronicznych, aby w pełni wykorzystać mikrokontroler. Zasilana napięciem 5-12 VDC, a programowana głównie przez port USB-B.

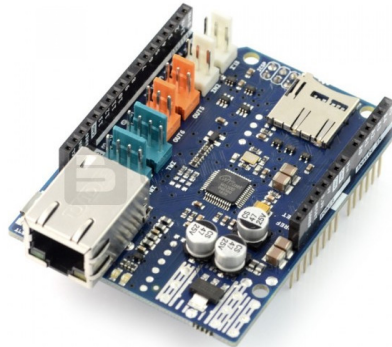


Rysunek 1. Płytkę elektroniczną Arduino Uno Rev3 [5]

Język programowania jest bardzo zbliżony do C++. Dodatkowym atutem Arduino jest dostępność bardzo dużej ilości gotowych bibliotek do obsługi urządzeń zewnętrznych lub podprogramów, co w efekcie oszczędza czas pisania kodu.

2.2. Ethernet Shield

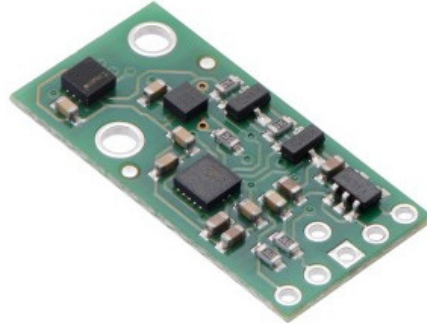
Uniwersalna nakładka do Arduino, umożliwiająca połączenie się z siecią Ethernet. Jej rozstaw pinów odpowiada rozstawowi Arduino, dlatego wystarczy ją tylko połączyć z płytką Arduino i jest gotowa do użycia. Moduł ten jest wykonany na układzie W5500, a także posiada czytnik kart SD.



Rysunek 2. Nakładka Ethernet Shield V2 na Arduino Uno [6]

2.3. Czujnik AltIMU-10 5V

Układ do pomiaru przyspieszeń, prędkości kątowej, wysokości oraz pola magnetycznego. Jest połączeniem 3-osiowego akcelerometru i żyroskopu LSM6DS33, barometru LPS25H i magnetometru LIS3MDL. Komunikacja z innymi urządzeniami wykonywana jest po magistrali I²C.

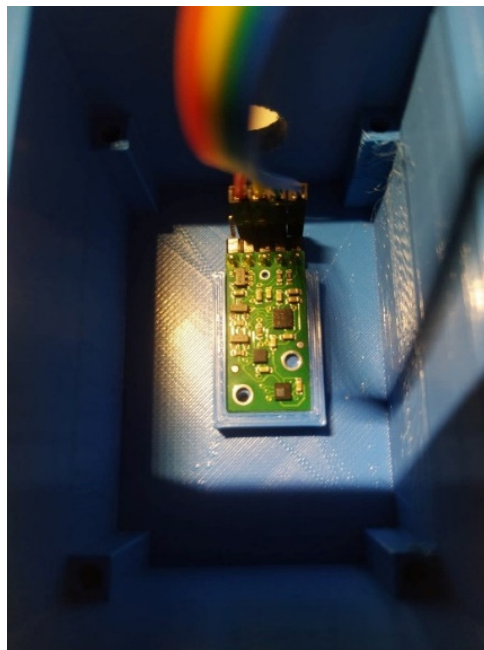


Rysunek 3. Układ AltIMU-10 5V [1]

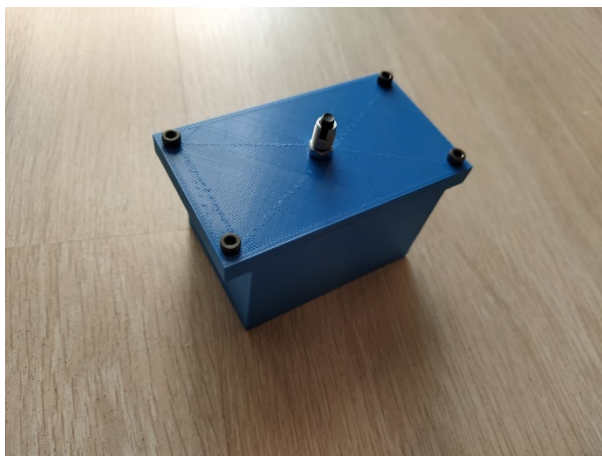
Dzięki tym sensorom można wyznaczyć położenie obiektu w przestrzeni trójwymiarowej. Wszystkie te czujniki obsługiwane są przy użyciu ogólnodostępnych, przygotowanych przez producenta bibliotek. Cały układ zasilany jest napięciem 2,5-5,5 VDC [1].

2.4. Obudowa

Obudowa na czujnik, została wykonana w technologii druku 3D. Do początkowych testów układu pomiarowego, obudowa nie musiała być szczelna ani bardzo wytrzymała.



Rysunek 4. Widok układu AltIMU-10 wewnątrz wydrukowanej obudowy [opracowanie własne]



Rysunek 5. Widok obudowy układu pomiarowego [opracowanie własne]

Na spodzie wnętrza obudowy umieszczony został czujnik. Miejsce na czujnik zostało dobrane w taki sposób, aby akcelerometr znajdował się dokładnie na środku obudowy. Na zewnętrznej części obudowy zaznaczone zostały kierunki osi zgodnych z odczytami z akcelerometru. Obudowa została wyposażona w cztero-pinowe gniazdo, którym doprowadzone jest zasilanie oraz przewody transmisji danych pomiędzy Arduino Uno, a układem AltIMU-10. Cały układ pomiarowy zasilany jest napięciem 12 VDC poprowadzone na złącze DC w Arduino Uno. Następnie z wyjścia VIN na płytce Arduino Uno, zasilanie to jest prowadzone na stabilizator liniowy znajdujący się zaraz przy czujniku w wydrukowanej obudowie, gdzie napięcie obniżane jest do 5 VDC, którym zasilany jest już bezpośrednio czujnik.

3. Inklinometr dynamiczny firmy SICK

Inklinometr, jest to dynamiczny czujnik nachylenia jednoosiowy lub dwuosiowy, wprowadzony na rynek przez firmę SICK. Zapewnia on precyzyjny pomiar i szybki czas reakcji, co przekłada się na możliwość bezpieczniejszej i wydajniejszej pracy w czasie rzeczywistym. Głównie stosowany jest w branży maszyn budowlanych, w pojazdach specjalistycznych i maszynach rolniczych [2].



Rysunek 6. Inklinometr dynamiczny oraz programator PGT-12-Pro [2]

Czujnik ten wykorzystuje wbudowaną kompensację żyroskopową i akcelerometr. Algorytm z filtrami fuzji czujników niweluje zniekształcenia sygnału spowodowane przez boczne ślizgi, wibracje i wstrząsy. Szybsze i dokładniejsze pomiary nachylenia zapewniają wsparcie sterowania pojazdem w czasie rzeczywistym [2].

Czujnik opiera swoje działanie na inercyjnej jednostce pomiarowej (IMU), składającej się z czujnika przyspieszenia i żyroskopu, wykorzystującego technologię MEMS do każdego pomiaru w kierunkach 360°, x, y, i z. Był on sprawdzony w trudnych warunkach, a zaimplementowany w nim algorytm czujnika przetwarza pomiary w celu rozróżnienia prawdziwych wartości nachylenia i wyeliminowania niepożądanych sygnałów spowodowanych przyspieszeniami bocznymi [2].

Inklinometry firmy SICK oferują interfejsy komunikacyjne SAE J1939 do integracji z samochodowymi systemami sterowania, a także komunikację CAN Open do zastosowań w automatyce przemysłowej. Uruchomienie czujników jako części systemu sterowania odbywa się poprzez PLC lub oprogramowanie zorientowane na sterowniku, lub użytkownicy mają możliwość użycia ręcznego narzędzia programistycznego SICK'a PGT-12-Pro [2].

4. Porównanie czujników

Układy te zostały porównane pod kątem parametrów mechanicznych, elektrycznych, wydajnościowych, a także prostoty obsługi.

4.1. Parametry mechaniczne

Autorski układ pomiarowy nie zajmuje dużo miejsca, ponieważ sam czujnik ma wymiary 25 mm x 13 mm x 3mm. Masa czujnika bez złączy to 0,8 g. Umożliwia to wbudowanie go w dowolnie zaprojektowaną obudowę, którą można dopasować do

określonego zadania. W zależności od poziomu rozbudowania obudowy masa całego układu będzie różna. Czujnik ten nie ma żadnego zabezpieczenia przed wodą i pyłem zapewnionego przez producenta. Od projektanta układu pomiarowego zależy w jaki sposób zabezpieczy ten czujnik [1].

Inklinometr dynamiczny umieszczony jest w obudowie z wyprowadzonym gniazdem M12 na 5-cio pinową wtyczkę. Wymiary obudowy to 66 mm x 90 mm x 36 mm. Obudowa posiada cztery otwory o średnicy 5,5 mm do przymocowania czujnika. Waga całego czujnika to 200g. Obudowa ta ma klasę szczelności IP67, a wykonana jest z tworzywa sztucznego PBT [4].

4.2. Parametry elektryczne

AltIMU-10 zasilany jest napięciem 2,5-5,5 VDC, co powoduje, że źródło zasilania nie może znajdować się zbyt daleko, chyba, że tak jak w przypadku autorskiego układu pomiarowego, doprowadzone zasilanie jest dużo większe, a w samej obudowie napięcie to jest obniżane np. przez stabilizator. Większym problemem jest jednak sam protokół komunikacyjny, ponieważ przy użyciu magistrali komunikacyjnej I²C można osiągnąć zasięg tylko do kilku metrów, co znacznie ogranicza możliwość zastosowania tego czujnika w znacznym oddaleniu od układu przetwarzającego dane. Prędkość przesyłania danych dla tego protokołu to maksymalnie 3,4 Mb/s [3].

TMM88-PCI090 zasilany jest napięciem 8-36 VDC oraz protokół komunikacyjny CANopen umożliwia stosowanie tego czujnika w bardzo dużych odległościach od jednostki przetwarzającej dane. Odległość ta według standardu ISO może wynosić do 40 m. Jednak przy odpowiedniej rozbudowie sieci np. łącząc kilka urządzeń w szeregu, można osiągnąć odległość nawet do 1000 m. Prędkość przesyłania danych dla tego układu to maksymalnie 1 Mb/s [4].

W obydwóch przypadkach odległość od jednostki przetwarzającej dane ma wpływ na prędkość komunikacji. Zakres temperatury roboczej wynosi od -40°C do 80°C [3, 4].

4.3. Parametry wydajnościowe

Główne pomiary wykonywane przez te czujniki to przyspieszenie ziemskie oraz prędkość kątowna. Porównanie zakresów pomiarowych zostało przedstawione w tabeli nr 1.

Tabela 1. Porównanie zakresów pomiarowych czujników [3] [4]

	AltIMU-10 5V	TMM88-PCI090
Akcelerometr, g	±2, ±4, ± 8, ±16 (konfigurowalne)	±8
Żyroskop, °/s	±125, ±245, ± 500, ±1000, ±2000 (konfigurowalne)	±250

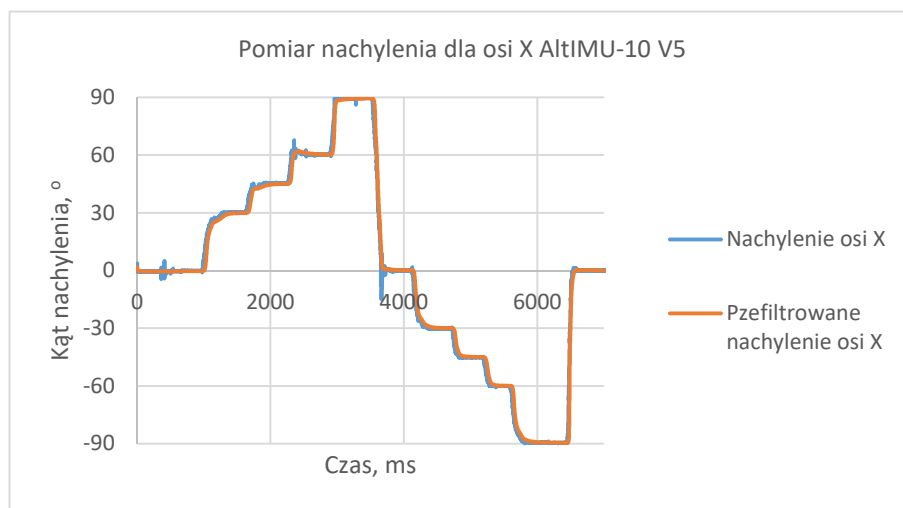
Rozdzielczość obu czujników wynosi $0,01^\circ$. Oba czujniki mają wbudowane filtry 8 rzędu, w celu tłumienia zakłóceń pomiarów.

To co rozróżnia te czujniki to inne możliwości z uwagi na ich konstrukcję. Układ AltIMU-10 ma również wbudowany barometr i magnetometr, które umożliwiają pomiar ciśnienia, temperaturę, wysokość nad poziomem morza oraz orientację magnetyczną na kuli ziemskiej. Układ TMM88-PCI090 może przesyłać wartości kwaternionów, które umożliwiają jego orientację w przestrzeni 3D [3, 4].

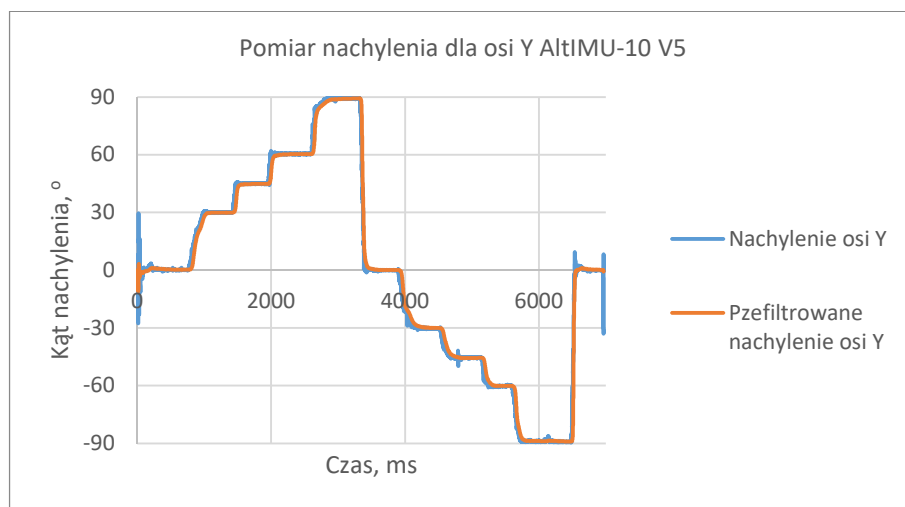
4.4. Odczyty z czujników

Pomiar odczytów nachylenia został wykonany poprzez ustawianie czujnika w konkretnych położeniach kątowych tj. 0° , 30° , 45° , 60° , 90° , 0° , -30° , -45° , -60° , -90° dla osi X i Y. Pomiar odczytów z żyroskopu dla osi Z, polegał na zapisie wartości z czujnika w czasie jego bezruchu. Oba czujniki zostały ustawione na taką samą wartość zakresów pomiarowych tj. przyspieszenie ± 8 g, wskaźnik obrotów ± 250 $^\circ/\text{s}$.

W przypadku układu AltIMU-10 V5, odczyty akcelerometru były odbierane jako wartości z przedziału 0 do 32766, które należało odpowiednimi obliczeniami zamienić na wartości kątowe. Uzyskana dokładność to $0,01^\circ$. W trakcie pomiaru były zauważalne szумы, dlatego oprócz wbudowanych filtrów aktywnych, zastosowano także filtr Kalmana w postaci gotowej biblioteki „SimpleKalmanFilter”. Zapis aktualnej pozycji kątovej odbywał się w każdej pętli programowej mikrokontrolera, która trwała średnio 24 ms. Odczyty z czujnika zapisywane były na karcie SD, a następnie zostały przedstawione w postaci wykresów 1, 2, 3.

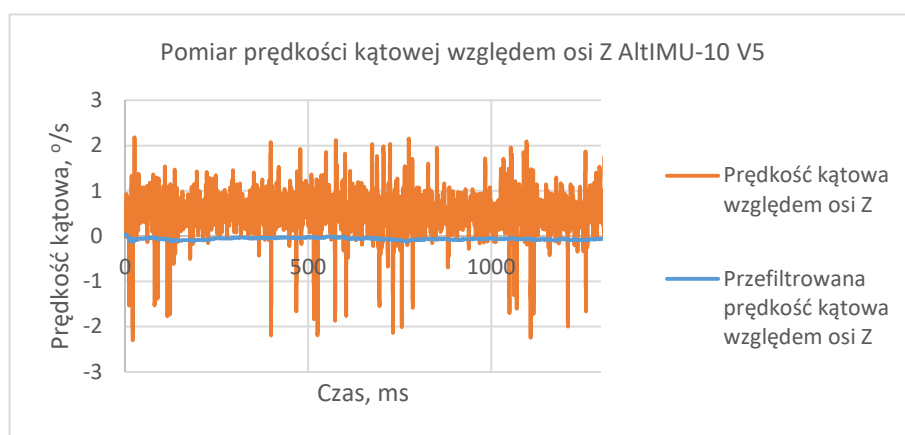


Wykres 1. Pomiar nachylenia dla osi X [opracowanie własne]



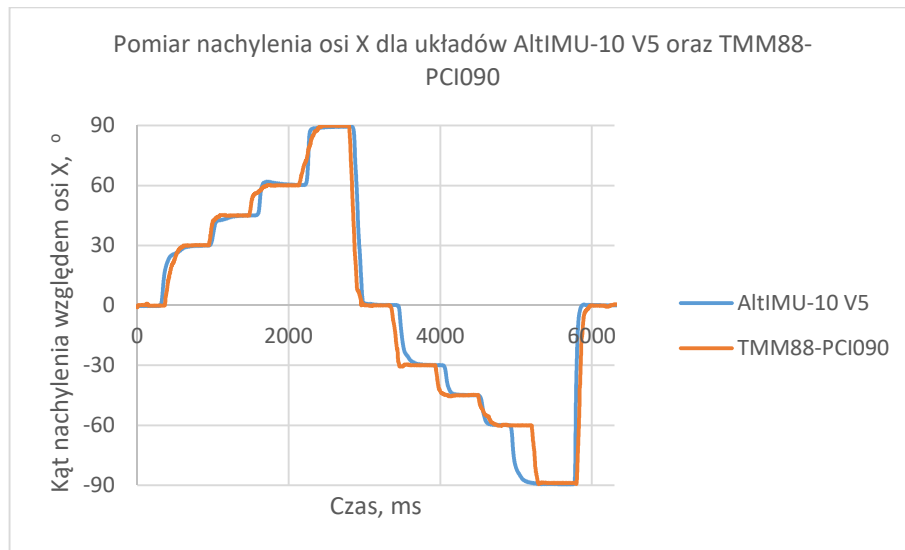
Wykres 2. Pomiar nachylenia dla osi Y [opracowanie własne]

Pomiar prędkości kątowej z żyroskopu, wymagały określenia offsetu kalibracyjnego odejmowanego od wartości odczytywanej z czujnika, aby określić, kiedy czujnik znajduje się w bezruchu. Nawet po odjęciu offsetu kalibracyjnego, wymagane jest zastosowanie filtra.

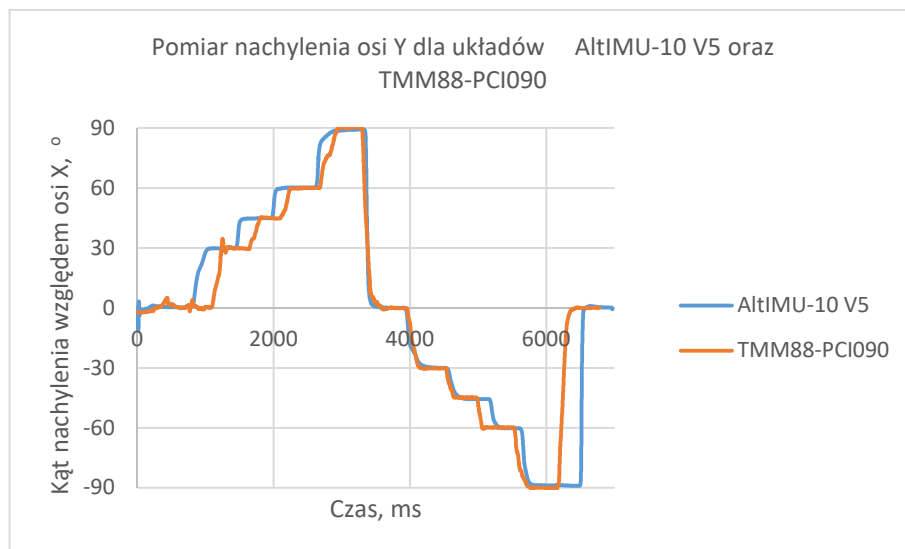


Wykres 3 Pomiar odczytów z żyroskopu względem osi Z w czasie bezruchu czujnika [opracowanie własne]

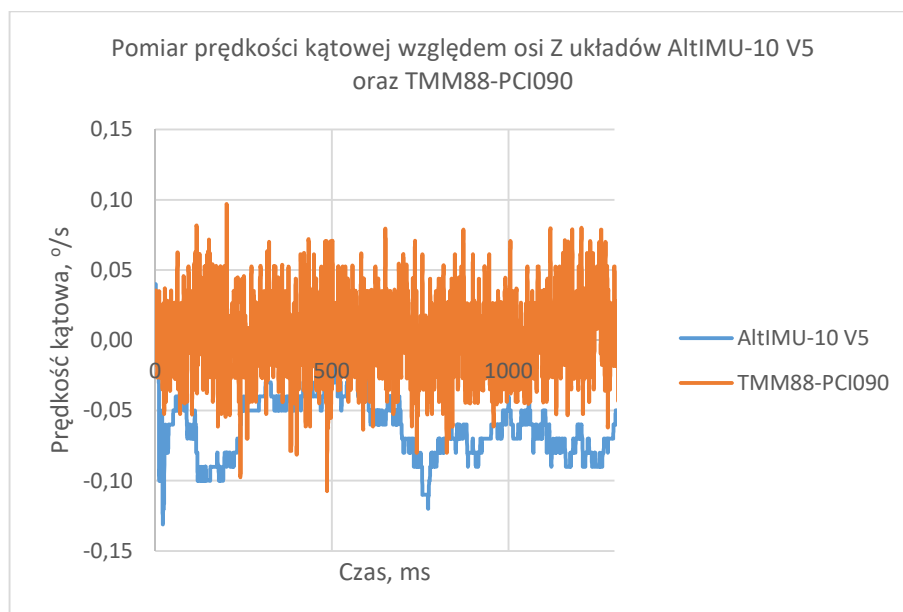
W przypadku odczytów z czujnika TMM88-PCI090 były one rejestrowane w oprogramowaniu Codesys, przy użyciu narzędzia „trace”. Czas próbkowania wynosił 25 ms. Wykresy otrzymane w oparciu o inklinometr dynamiczny TMM88-PCI090 zostały nałożone bezpośrednio na wykresy układu AltIMU-10 V5, które został przedstawiony poniżej. Z uwagi na inny czas próbkowania, widać przesunięcie pomiędzy wykresami, jednak metodologia pomiaru została zachowana.



Wykres 4. Pomiar nachylenia dla osi X – zestawienie dwóch układów pomiarowych [opracowanie własne]



Wykres 5. Pomiar nachylenia dla osi Y – zestawienie dwóch układów pomiarowych [opracowanie własne]



Wykres 6. Pomiar prędkości kątowej względem osi Z – zestawienie dwóch układów pomiarowych [opracowanie własne]

5. Podsumowanie

Obydwa układy działają w oparciu o czujniki typu MEMS i powstały w celu pomiaru nachylenia kątowego. Zasadnicza różnica jest taka, że czujnik TMM88-PCI090 jest gotowym produktem, niewymagającym specjalistycznej wiedzy, aby z niego korzystać. Układ AltIMU-10 V5 wymaga umiejętności programowania, przekształceń matematycznych, ręcznego zabezpieczenia układu np. przed wilgocią. Różnica ta odzwierciedlona jest w cenie tych układów.

W obu przypadkach, błąd stabilności pomiaru wynosiła ok. $0,02^\circ$. Czas ustalania sygnału inklinometru następował w czasie rzeczywistym, układ AltIMU-10 miał kilku milisekundowe opóźnienie z uwagi na zastosowanie filtra Kalmana. Przy odczytach prędkości kątowej z żyroskopu względem osi Z, w obu przypadkach występowały zakłócenia sięgające do $0,1\text{ %/s}$.

Uważam, że tak układ AltIMU-10 V5, jak i TMM88-PCI090 są bardzo dobrymi układami do pomiaru nachylenia kąta, które można zastosować w przemyśle. Projektant w zależności od swoich umiejętności i finalnego celu zastosowania takiego inklinometru, musiałby zdecydować, który z tych układów bardziej nadaje się do jego aplikacji.

LITERATURA

1. Artykuł internetowy: <https://botland.com.pl/pl/czujniki-9dof-imu/5728-altimu-10-v5-zyroskop-akcelerometr-kompas-i-wysokosciomierz-i2c-3-5v-pololu-2739.html>, dostęp dnia 15.09.2020.
2. Artykuł internetowy: <https://iautomatyka.pl/dynamiczne-czujniki-nachylenia-precyzyjny-i-pewny-pomiar-w-6-stopniach-swobody/>, dostęp dnia 15.09.2020.
3. Dokumentacja techniczna, LSM6DS33, STMicroelectronics.
4. Dokumentacja techniczna TMM88-PCI090, Sick.
5. Serwis internetowy: https://botland.com.pl/56547-large_default/arduino-uno-rev3-a000066.jpg, dostęp 26.09.2020
6. Serwis internetowy: https://botland.com.pl/54967-large_default/arduino-ethernet-shield-2-z-czytnikiem-kart-microsd-a000024.jpg, dostęp 26.09.2020.