



KoNaR

KOŁO NAUKOWE ROBOTYKÓW

Koło Naukowe Robotyków „KoNaR”

WSTĘPNY PROJEKT MODUŁU IMU

Adrian Ciż
Marek Gulanowski
Dora Sumisławska

8 stycznia 2011

Spis treści

1	Wstęp	2
2	Akcelerometry - moduł testowy i badania	2
2.1	Akcelerometry w modułach IMU	2
2.1.1	Przegląd dostępnych czujników	2
2.1.2	Wybrany model	3
2.2	Moduł testowy	3
2.2.1	Projekt modułu testowego	4
2.2.2	realizacja układu	7
2.2.3	Oprogramowanie	8
2.2.4	Badania	13
3	Żyroskopy - moduł testowy i badania	14
3.1	Trójosiowe badanie prędkości kątowej w module IMU	14
3.1.1	Strona teoretyczna	14
3.1.2	Sposób wyboru żyroskopów	14
3.1.3	Wybrane układy	15
3.2	Realizacja układu do badania żyroskopów	16
3.2.1	Projekt układu	16
3.2.2	Projekt płytki drukowanej	20
3.3	Wykonany układ	22
3.3.1	Wykonany układ	22
3.3.2	Oprogramowanie	23
3.3.3	Działanie układu	24
4	Kompasy - moduł testowy i badania	25
4.1	Czujniki pola magnetycznego w modułach IMU	25
4.1.1	Rodzaje czujników pola magnetycznego	25
4.1.2	Kompas elektroniczny - analiza zastosowania czujników	26
4.2	Kompas elektroniczny w zastosowaniu IMU - moduł testowy	27
4.2.1	Realizacja układu sensorycznego	27
4.2.2	Sprzężenie zwrotne układu	28
4.2.3	Filtracja	30
4.2.4	Schemat całego modułu	31
4.3	Kompas elektroniczny - moduł testowy	34
4.3.1	Opis wykonanego urządzenia	35
5	IMU - koncepcja ogólna	40
5.1	Projekt modułu IMU	40
5.1.1	Ogólna struktura układu	40
5.1.2	Podukład z mikrokontrolerem	41
5.1.3	Podukład z akcelerometrem cyfrowym	44
5.1.4	Podukład z żyroskopami analogowymi	44
5.1.5	Podukład z kompasem	46
5.2	Wnioski	47

1 Wstęp

Tematem niniejszego projektu jest zaprojektowanie czujnika typu IMU (Inertial Measurement Unit - inercyjnej jednostki pomiarowej) do zastosowania w INS (Inertial Navigation System - systemie nawigacji inercyjnej). Tego typu systemy są powszechnie stosowane w technologii wojskowej i kosmicznej, a postęp w dziedzinie sensorów typu MEMS (Microelectromechanical systems) prowadzi do trwającego obecnie procesu poszerzania kręgu ich zastosowań [24]. Trudności napotymane na drodze użytkowania systemów INS wynikają z koniecznych częstych transformacji układu współrzędnych (np. dla pojazdu będącego w ruchu w przestrzeni trójwymiarowej), błędów pomiarowych samych czujników, a także szumu występującego w układzie pomiarowym [21]. Układy IMU dostępne są w postaci gotowych modułów. Celem realizacji tego zagadnienia jest zaprojektowanie modułu IMU o funkcjonalności porównywalnej do gotowych rozwiązań dostępnych na rynku oraz weryfikacja, czy samodzielne wykonanie takiego czujnika jako rozwiązania dedykowanego dla konkretnego układu może być opłacalne pod względem poniesionych kosztów i uniwersalności zastosowań.

2 Akcelerometry - moduł testowy i badania

Adrian Ciż

2.1 Akcelerometry w modułach IMU

W zastosowaniach, do których przeznaczony jest moduł IMU, czyli takich jak nawigacja, określanie orientacji obiektu, stabilizacja położenia, zakres mierzonych przyspieszeń nie przekracza kilku g, dlatego akcelerometr został wybrany z kategorii low-g. Spośród parametrów, jakimi można się kierować przy wyborze sensora, najważniejszymi są poziom szumów, czułość oraz dostępne zakresy pomiarowe. Akcelerometry można też podzielić ze względu na sposób akwizycji danych, a dokładniej na analogowe i cyfrowe oraz liczbę osi, wzdłuż których przeprowadzany jest pomiar. W tym przypadku, aby ograniczyć koszt i rozmiary modułu, wybór zostanie ograniczony do modeli cyfrowych, trzyosiowych.

2.1.1 Przegląd dostępnych czujników

Analog Devices posiada jedynie dwa modele akcelerometrów, spełniających powyższe kryteria: ADXL345, ADXL346, przy czym aktualnie jedynie pierwszy z nich jest dostępny na rynku. Posiada on cztery zakresy pomiarowe ($\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$), stałą rozdzielczość $4mg/LSB$ zapewnianą przez zmienną rozdzielczość próbkowania od 10 do 13 bitów w zależności od zakresu, interfejsy SPI i I²C, programowalne przerwania oraz detekcję spadku swobodnego i „dwukliku”. Poza wymienionymi wyżej modelami cyfrowymi Analog Devices ma w ofercie znacznie więcej modeli analogowych [1].

Freescale również nie oferuje wielu trzyosiowych, cyfrowych sensorów i, tak samo jak poprzednia firma, proponuje znacznie więcej wersji analogowych czujników [2]. Dostępne są:

- MMA8450: $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/$, rozdzielczość 12 bit, szумы $375 \mu g/\sqrt{Hz}$, interfejs I²C, programowalne przerwania
- MMA7455/6: $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/$, rozdzielczość 8,10 bit, interfejsy SPI, I²C, programowalne przerwania
- MMA7660: $\pm 1.5g$, rozdzielczość 6 bit, interfejs I²C, programowalne przerwania

STMicroelectronics posiada w ofercie największy wybór [4] akcelerometrów w analizowanej grupie:

- LIS302DL: $\pm 2g/\pm 8g/$, rozdzielczość 8 bit,
- LIS302DLH: $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/$, rozdzielczość 12 bit,
- LIS331DL: $\pm 2g/\pm 8g/$, rozdzielczość 8 bit,
- LIS331DLF: $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/$, rozdzielczość 6 bit,
- LIS331DLH: $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/$, rozdzielczość 12 bit,
- LIS331DLM: $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/$, rozdzielczość 8 bit,
- LIS33DE: $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/$,
- LIS35DE: $\pm 2g/\pm 8g/$,
- LIS3LV02DL/Q: $\pm 2g/\pm 6g/$, rozdzielczość 12 bit,

Wszystkie posiadają programowalne przerwania, interfejsy SPI i I²C, detekcję spadku swobodnego oraz zależność czułości od temperatury na poziomie $0.025 \%/^{\circ}C$

2.1.2 Wybrany model

Z wszystkich wymienionych sensorów najbardziej precyzyjne, według not katalogowych, są produkty firmy ST, o rozdzielczości 12 bit. Jako, że każdy z nich spełnia wymagania, wykorzystany do dalszych badań został model LIS3LV02DL [17], również ze względu na posiadane darmowe próbki.

2.2 Moduł testowy

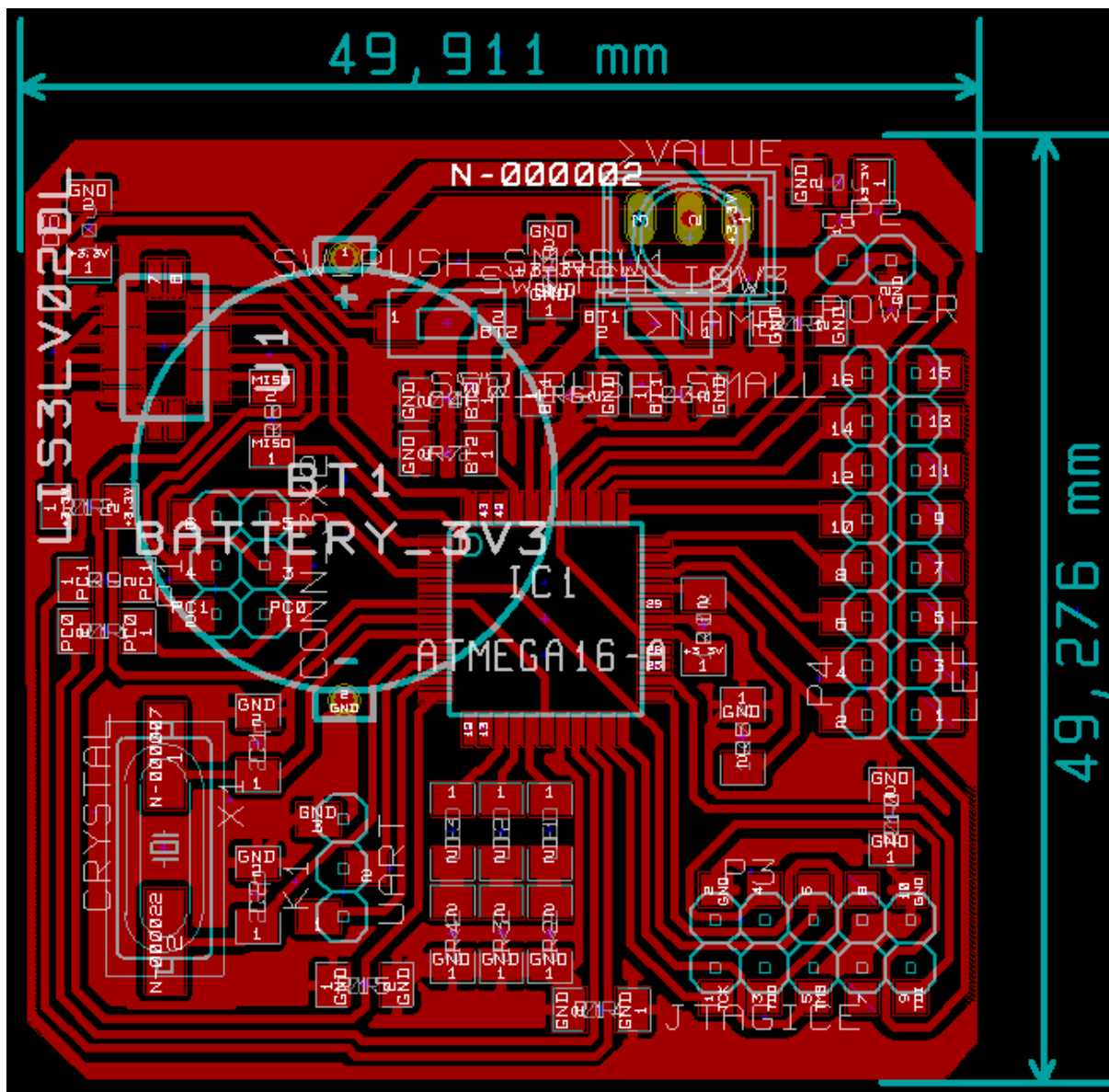
Aby w łatwy i wygodny sposób można było przetestować możliwości akcelerometru, układ testowy powinien posiadać kilka sprzyjających temu cech i przede wszystkim na nich skupiono się podczas jego projektowania. Mianowicie moduł ten powinien:

- być stosunkowo mały,
- być solidny,
- posiadać niezależne zasilanie własną baterią
- posiadać ilość pamięci pozwalającą na zapamiętanie historii testu,

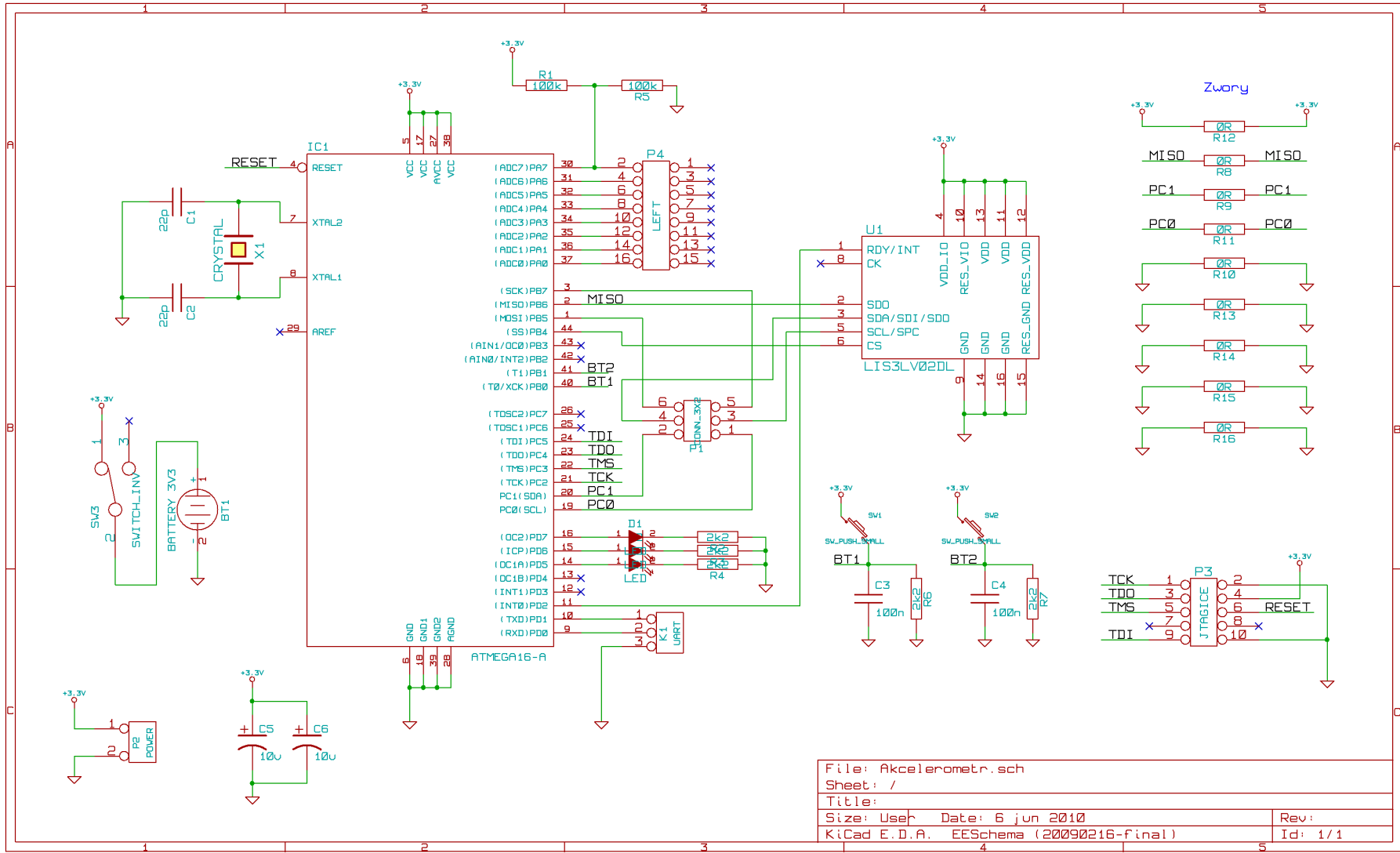
- posiadać prosty interfejs do komunikacji z komputerem i akwizycji zebranych danych,
- posiadać podstawowy interfejs do jego obsługi i obserwacji zdarzeń już w trakcie testów

2.2.1 Projekt modułu testowego

Schemat tak zaprojektowanego układu można zobaczyć na rysunku 2. Urządzenie zasilane jest z baterii 3V CR2032 lub z zewnętrznego źródła. Komunikuje się ono z komputerem poprzez interfejs UART, natomiast do komunikacji z użytkownikiem wyposażone zostało w dwa przyciski i trzy diody. Wymiana danych pomiędzy samym czujnikiem a mikrokontrolerem również jest konfigurowalna i może się odbywać poprzez interfejsy SPI lub I^2C . Całością steruje procesor ATmega16L [7], który może pracować z napięciem 3.3V, co wymagane jest ze względu na akcelerometr, i częstotliwością do 8MHz. Posiada też wszystkie wymienione wcześniej interfejsy, dlatego został uznany za wystarczający do tego zadania. Aby zapewnić możliwe małe rozmiary modułu testowego, w projekcie urządzenia zdecydowano się na wykorzystanie jedynie elementów smd. Końcowy projekt płytki widać na rysunku 1.



Rysunek 1: Projekt płytki PCB układu testowego modułu akcelerometrów

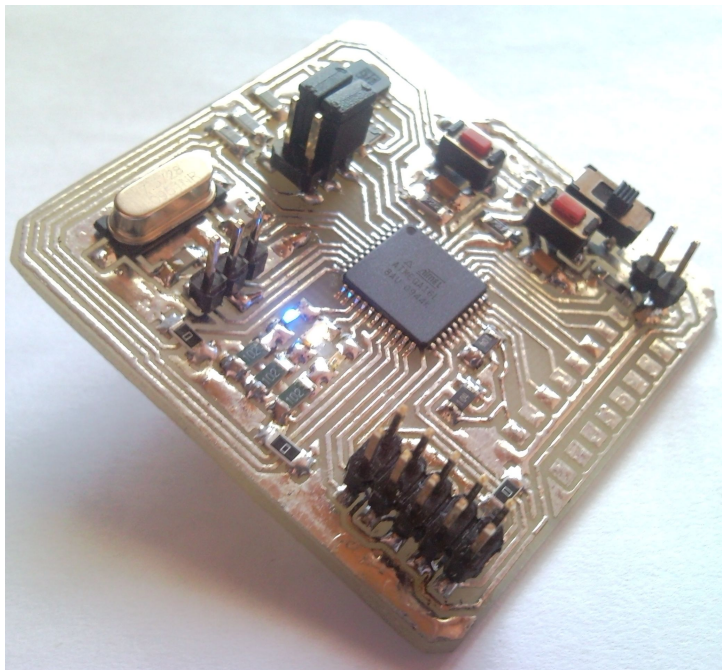


File: Akcelerometr.sch	
Sheet: /	
Title:	
Size: User	Date: 6 jun 2010
KiCad E.D.A. EESchema (20090216-final)	
Rev:	Id: 1/1

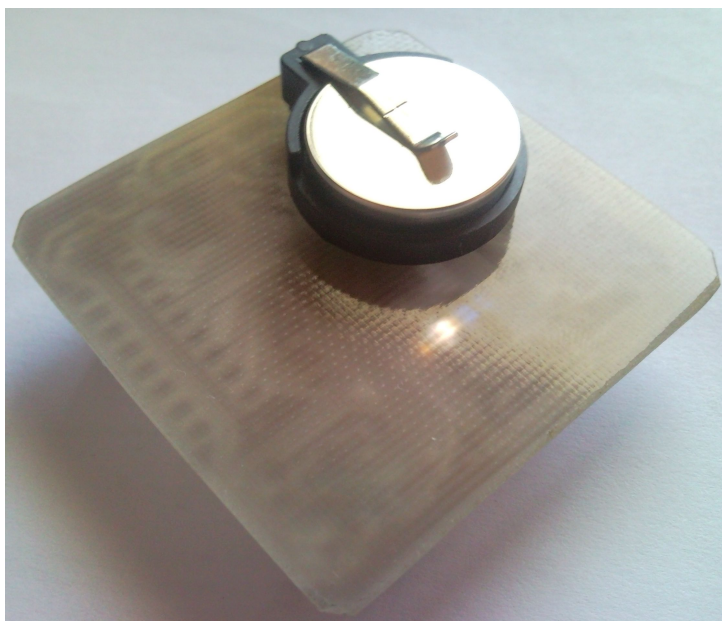
Rysunek 2: Schemat układu testowego modułu akcelerometrów

2.2.2 realizacja układu

Zrealizowany według przedstawionego powyżej projektu układ można zobaczyć na rysunkach 3 i 4.



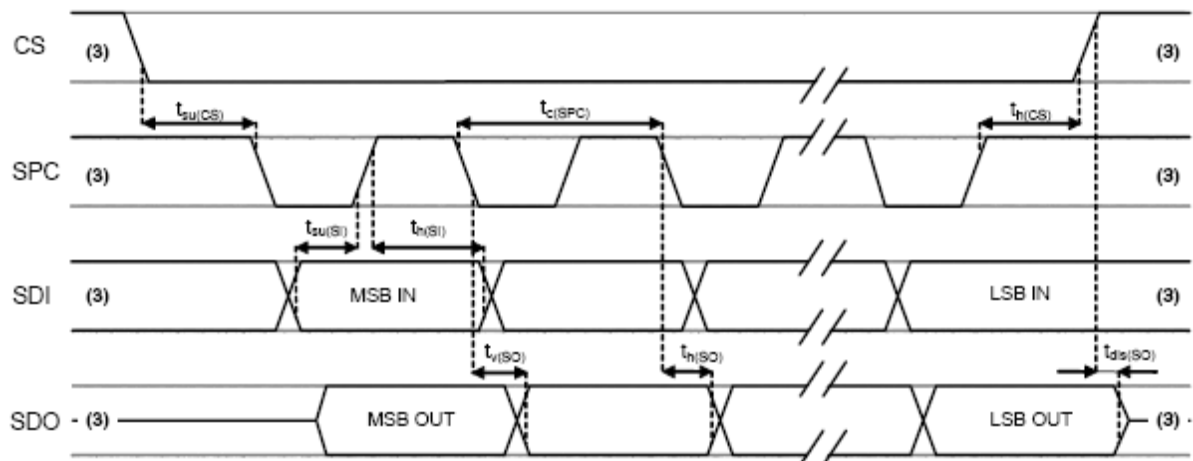
Rysunek 3: Układ testowy akcelerometrów, widok z góry



Rysunek 4: Układ testowy akcelerometrów, widok z dołu

2.2.3 Oprogramowanie

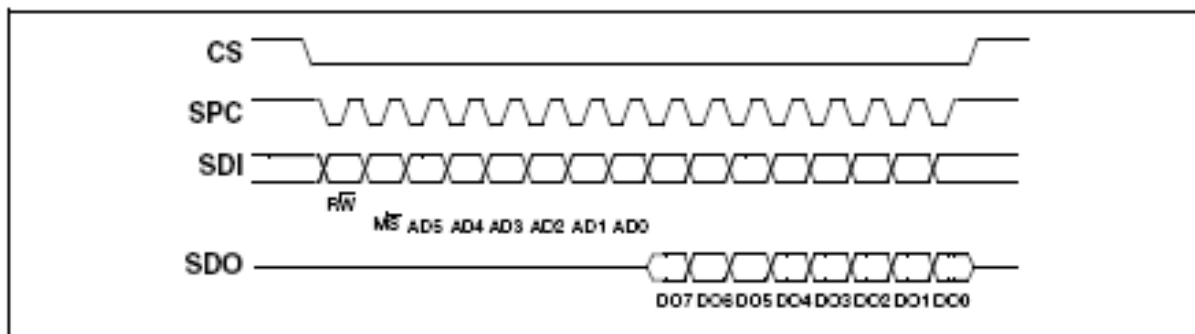
Dla zrealizowanego układu, w celu przeprowadzenia doświadczeń, przygotowano oprogramowanie, które pozwoliło się skomunikować z akcelerometrem i zbadać jego możliwości. Transmisja danych między sensorem a mikrokontrolerem odbywa się za pomocą interfejsu SPI. Przy tym połączeniu master może wysyłać do akcelerometru, zegar o częstotliwości maksymalnie 8MHz. Pozostałe parametry sygnału, jak polaryzacja zegara czy poszczególne czasy przebiegu, widoczne są na wykresie poniżej 5 i tabeli 6 mu towarzyszącej, pochodzącymi z dokumentacji czujnika [17].



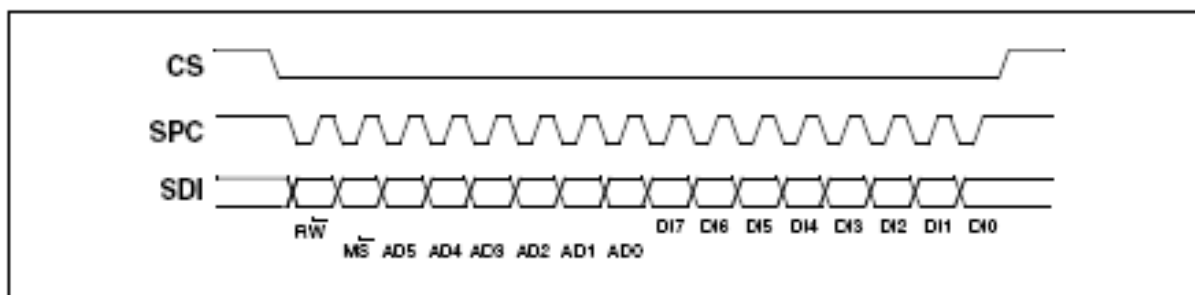
Rysunek 5: Wykres czasów dla SPI

Symbol	Parameter	Value ⁽¹⁾		Unit
		Min	Max	
$t_{c}(SPC)$	SPI clock cycle	125		ns
$f_{c}(SPC)$	SPI clock frequency		8	MHz
$t_{su}(CS)$	CS setup time	5		ns
$t_{th}(CS)$	CS hold time	10		
$t_{su}(SI)$	SDI input setup time	5		
$t_{th}(SI)$	SDI input hold time	15		
$t_{v}(SO)$	SDO valid output time		55	
$t_{th}(SO)$	SDO output hold time	7		
$t_{dis}(SO)$	SDO output disable time		50	

Rysunek 6: Tabela opisująca wykres czasów SPI



Rysunek 7: Zapis przez SPI



Rysunek 8: Odczyt przez SPI

Zarówno przy odczycie 8 jak i zapisie 7 przesyłane są przynajmniej dwa bajty z których pierwszy jest adresem rejestru w akcelerometrze, natomiast drugi odpowiednio dowolnymi danymi pozwalającymi odebrać wybrany bajt rejestru lub danymi do zapisu. W przypadku bajtu adresu należy zwrócić uwagę na dwa najbardziej znaczące bity, z których pierwszy oznacza tryb zapis/odczyt, a drugi pozwala wybrać tryb wielokrotnego/pojedynczego odczytu lub zapisu, pozwalający wykonywać dalsze operacje na kolejnych komórkach rejestrów, bez ponownego przesyłania adresu. Opisaną powyżej komunikację z akcelerometrem realizuje funkcja przedstawiona na listingu 1, po uprzednim, odpowiednim ustawieniu rejestrów mikrokontrolera. Wykonując jakiegokolwiek transmisje danych należy zwrócić baczna uwagę na adresowane rejestry, zgodnie z ostrzeżeniem w dokumentacji nadpisanie któregoś z zarezerwowanych rejestrów może permanentnie uszkodzić czujnik.

Przed przystąpieniem do odbierania danych z czujnika należy ustawić trzy rejestry konfiguracyjne CTRL_REG1, CTRL_REG2 i CTRL_REG3. Pierwszy z nich pozwala na włączenie całego sensora, poszczególnych osi, trybu Self Test oraz ustawienie częstotliwości próbkowania sygnału. Drugi konfiguruje zakres pomiarów, komunikację i pozwala na włączenie bądź wyłączenie przerw. Ostatni służy do ustawienia parametrów filtra górnoprzepustowego, który jest domyślnie wyłączony. Filtr dolnoprzepustowy jest automatycznie dostosowywany do wybranej, w pierwszym z rejestrów, częstotliwości próbkowania. Dokładny opis wszystkich rejestrów przedstawiony jest w tabelach 9, 10 i 11. Funkcję przygotowującą te rejestry można zobaczyć na listingu 2.

Table 30. Register (20h)

PD1	PD0	DF1	DF0	ST	Zen	Yen	Xen
-----	-----	-----	-----	----	-----	-----	-----

Table 31. Register description (20h)

PD1, PD0	Power Down Control (00: power-down mode; 01, 10, 11: device on)
DF1, DF0	Decimation Factor Control (00: decimate by 512; 01: decimate by 128; 10: decimate by 32; 11: decimate by 8)

Table 31. Register description (continued) (20h)

ST	Self Test Enable (0: normal mode; 1: self-test active)
Zen	Z-axis enable (0: axis off; 1: axis on)
Yen	Y-axis enable (0: axis off; 1: axis on)
Xen	X-axis enable (0: axis off; 1: axis on)

Rysunek 9: Opis rejestru konfiguracyjnego 1

Table 32. Register (21h)

FS	BDU	BLE	BOOT	IEN	DRDY	SIM	DAS
----	-----	-----	------	-----	------	-----	-----

Table 33. Register description (21h)

FS	Full Scale selection (0: $\pm 2g$; 1: $\pm 6g$)
BDU	Block Data Update (0: continuous update; 1: output registers not updated between MSB and LSB reading)
BLE	Big/Little Endian selection (0: little endian; 1: big endian)
BOOT	Reboot memory content
IEN	Interrupt ENable (0: data ready on RDY pad; 1: interrupt events on RDY pad)
DRDY	Enable Data-Ready generation

Table 33. Register description (continued) (21h)

SIM	SPI Serial Interface Mode selection (0: 4-wire interface; 1: 3-wire interface)
DAS	Data Alignment Selection (0: 12 bit right justified; 1: 16 bit left justified)

Rysunek 10: Opis rejestru konfiguracyjnego 2

Table 34. Register (22h)

ECK	HPDD	HPFF	FDS	res	res	CFS1	CFS0
-----	------	------	-----	-----	-----	------	------

Table 35. Register description (22h)

ECK	External Clock. Default value: 0 (0: clock from internal oscillator; 1: clock from external pad)
HPDD	High Pass filter enabled for Direction Detection. Default value: 0 (0: filter bypassed; 1: filter enabled)
HPFF	High Pass filter enabled for Free-Fall and Wake-Up. Default value: 0 (0: filter bypassed; 1: filter enabled)
FDS	Filtered Data Selection. Default value: 0 (0: internal filter bypassed; 1: data from internal filter)
CFS1, CFS0	High-pass filter Cut-off Frequency Selection. Default value: 00 (00: Hpc=512 01: Hpc=1024 10: Hpc=2048 11: Hpc=4096)

Rysunek 11: Opis rejestru konfiguracyjnego 3

Po przygotowaniu akcelerometru można rozpocząć odbieranie danych. Przygotowane oprogramowanie posiada osiem trybów pracy. Trzy z nich realizują odczyt ciągły z akcelerometru natychmiastowo wysyłając pobraną próbkę do komputera. Kolejne trzy pozwalają na przeprowadzenie testu, z zatrzymaniem serii pomiarowej w pamięci mikrokontrolera i późniejszym wysłaniem jej do komputera. Pomiar rozpoczyna się naciśnięciem lewego przycisku i pozwala na zapisanie do 512 próbek w odstępach co 10ms. Drugie naciśnięcie lewego przycisku zatrzymuje pomiar, a kolejne rozpoczyna wysłanie próbek do komputera i przygotowuje urządzenie do zebrania następnej serii. W siódmym trybie przewidziano obsługę przerw, jednak nie została ona jeszcze oprogramowana i przetestowana. Ostatni tryb jest przeznaczony do zmiany parametrów sensora, aktualnie pozwalają wybrać zakres pomiarowy 2g lub 6g. Tryb zmienia się prawym przyciskiem, a aktualny jego numer jest wyświetlany w postaci binarnej na diodach modułu. Pełne zestawienie wszystkich trybów znajduje się w tabeli poniżej.

Tryb	Opis
1	Ciągły odczyt osi X
2	Ciągły odczyt osi Y
3	Ciągły odczyt osi Z
4	Odczyt osi X do pamięci
5	Odczyt osi X do pamięci
6	Odczyt osi X do pamięci
7	Obsługa przerw (niezaimplementowana)
8	Zmiana zakresu pomiarowego (2g/6g)

Listing 1: Funkcja do komunikacji z akcelerometrem

```
1 char spiRW( char adr, char data, char RnW) {
2
3     if (RnW)
4         adr |= 0x80;
5     else
6         adr &= 0x7F;
7
8     SPDR = adr;
9
10    while (!(SPSR&(1<<SPIF)));
11
12    SPDR = data;
13
14    while (!(SPSR&(1<<SPIF)));
15
16    data = SPDR;
17
18    PORTB ^= (1<<PB4);
19    __asm__ ("nop" ::);
20    __asm__ ("nop" ::);
21    __asm__ ("nop" ::);
22    __asm__ ("nop" ::);
23    __asm__ ("nop" ::);
24    PORTB ^= (1<<PB4);
25
26    return data;
27
28 } // spiRW
```

Listing 2: Konfiguracja rejestrów

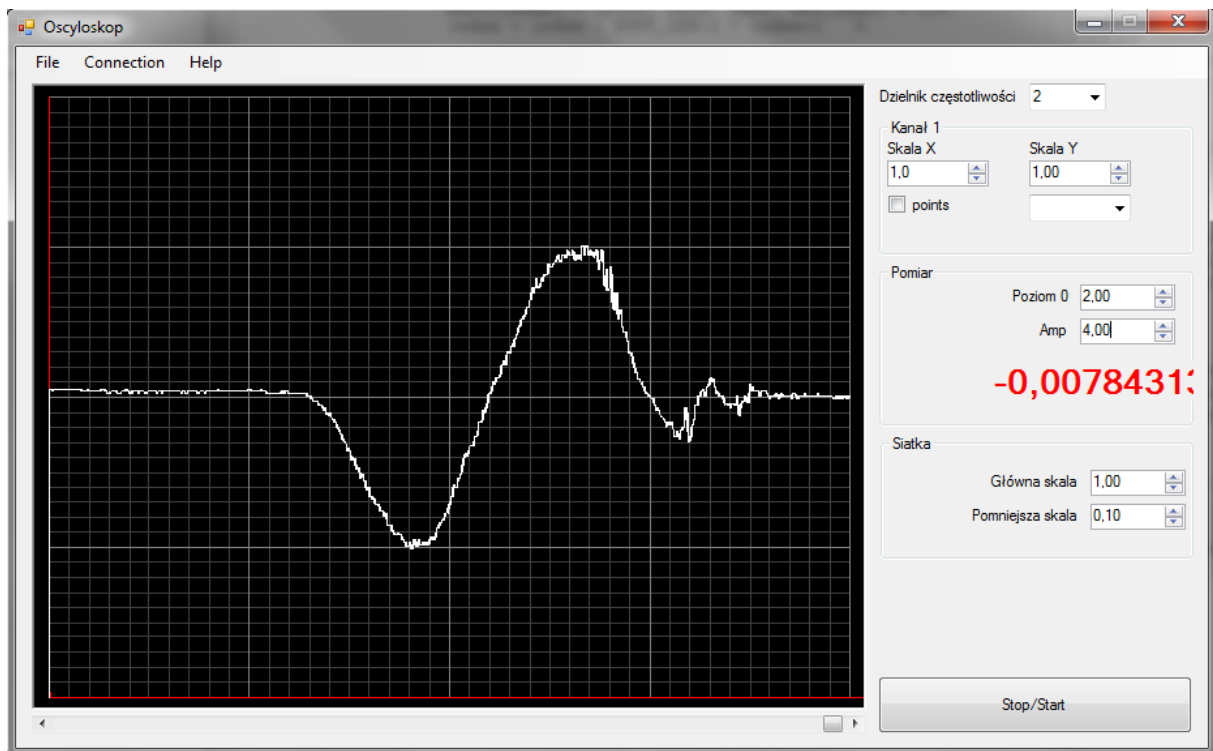
```
1 void InitAcc() {
2
3     spiRW( 0x20, 0xC7, RnW_WRITE);
4     spiRW( 0x21, 0x91, RnW_WRITE);
5
6 } // InitAcc
```



Rysunek 12: Rezultat badania spadku swobodnego w trybie 5. Obszar A - szpilka spowodowana naciśnięciem przycisku. Obszar B - Moment spadku swobodnego

2.2.4 Badania

Po uruchomieniu urządzenie przeprowadzone zostały przykładowe testy. Do zwizualizowania danych przesyłanych do komputera, posłużyła napisana wcześniej wcześniej aplikacja rysująca wykresy na podstawie danych otrzymanych poprzez interfejs UART. Dla zbadania podstawowej funkcjonalności układu wykonane zostały dwa pomiary w różnych, opisanych wcześniej, trybach i z różnymi zakresami pomiarowymi. Pierwszy z wykresów 12 prezentuje odczyt dla spadku swobodnego z wysokości około 2m, wykonany został w piątym trybie, czyli w osi Z z przechowaniem próbek w pamięci układu, na zakresie 6g. Na wykresie widać szpilkę spowodowaną wciśnięciem przycisku, a po chwili za nią obszar 0g z chwili w której moduł spadał. Drugi wykres 13 pokazuje wynik wykonania pełnego obrotu modułu, w okół osi Z ustawionej poziomo. Wykonany on został w trybie zerowym, czyli ciągłym odczycie dla osi X i na zakresie 2g.



Rysunek 13: Obrót modułu w okół osi Z ustawionej poziomo. Odczyt dla osi X

3 Żyroskopy - moduł testowy i badania

Marek Gulanowski

3.1 Trójosiowe badanie prędkości kątownej w module IMU

3.1.1 Strona teoretyczna

Inercyjny moduł pomiarowy typu IMU, w celu zapewnienia wystarczającej informacji do realizacji nawigacji w systemie INS, powinien posiadać 6 stopni swobody, z czego 3 stopnie swobody są związane z kątami rotacji w 3 osiach. W praktyce, w systemach inercyjnych dostępna jest informacja o prędkości obrotowej, którą należy scałkować, aby uzyskać dane dotyczące chwilowych kątów obrotu. Kąty te często określa się mianem *KKM: Kotysanie-Kiwanie-Myszkowanie (RPY: Roll-Pitch-Yaw)*.

Rodzaj sygnału wyjściowego jest konsekwencją mechanicznej budowy żyroskopu MEMS. Nie mierzy on, jak tradycyjne żyroskopy, stosowane np. w żegludze, odchylenia od pionu, lecz siłę Coriolisa, pozorną siłę, która towarzyszy ruchowi postępowemu, obserwowanemu z obracającego się układu odniesienia. [20]

3.1.2 Sposób wyboru żyroskopów

Przy wyborze żyroskopu do zastosowania w module IMU należy wziąć pod uwagę następujące parametry.

- Liczba osi, w których mierzona jest prędkość obrotowa.

Rozwiązaniem najlepszym byłoby zastosowanie żyroskopu trójosiowego. Jednak ten typ żyroskopu nie jest obecnie jeszcze powszechnie dostępny na rynku detalicznym, a dostępność podzespołów jest istotnym założeniem realizacji czujnika IMU w ramach niniejszego projektu. Należało zatem rozważyć zastosowanie dwóch lub trzech oddzielnych układów, każdy z nich zawierający żyroskop jedno- lub dwuosiowy.

- Rodzaj sygnału wyjściowego.
Może to być sygnał analogowy lub cyfrowy. Sygnał analogowy może być wyprowadzony po filtracji i wzmacnieniu lub bezpośrednio jako sygnał wyjściowy z żyroskopu. Sygnał analogowy daje większe możliwości obróbki, szczególnie jeśli jest wprowadzony w obu wymienionych wyżej postaciach.
- Maksymalna rozpoznawana prędkość obrotowa.
Wartość tego parametru zależy od planowanego zastosowania czujnika. Powinna ona być nie mniejsza niż największa wartość, jakiej wystąpienia można się spodziewać i której wystąpienie byłoby istotne z punktu widzenia działania systemu INS. W dostępnych na rynku żyroskopach wartość ta może wynosić od kilkudziesięciu do kilku tysięcy $^{\circ}/s$ (dps - degrees per second).
- Czułość.
Parametr silnie związany z maksymalną rozpoznawaną prędkością. Określa on, jak mocno zmieni się sygnał wyjściowy przy zmianie prędkości obrotowej, podawany w jednostce $mV/^{\circ}$. Wybór żyroskopu jest zatem w dużym stopniu kompromisem między tymi dwoma parametrami. Im większy bowiem zakres rozpoznawanych prędkości, tym mniejsza czułość, co utrudnia analizę sygnału przy niewielkich jego zmianach, zmniejszając stosunek sygnał/szum. Istotne zatem jest, aby nie stosować żyroskopu o zbyt dużym zakresie wartości prędkości obrotowej, lecz jedynie takim, jaki jest potrzebny w danym zastosowaniu.

3.1.3 Wybrane układy

Powyżej wykazano, jak istotne jest określenie rodzaju zastosowań modułu IMU w kwestii wyboru właściwych żyroskopów. Celem niniejszego projektu jest opracowanie czujnika w miarę możliwości uniwersalnego, zatem postanowiono wybrać żyroskop o możliwie dużym zakresie mierzonej prędkości obrotowej, lecz nie największym, a zatem rzędu kilkuset dps.

Do zastosowania wybrano układy LPR550AL oraz LPY550AL, ze względu na następujące czynniki:

- Łączna obsługa wszystkich 3 osi. Zastosowanie obu sensorów umożliwi badanie prędkości obrotowej we wszystkich osiach RPY, z jedną osią redundantną.
- Dostępność.
Czujniki te dostępne są w sprzedaży detalicznej na terenie Polski.
- Kompromis między zakresem a czułością.
Sensory spełniają założenie uniwersalności, czyli niezaniechania żadnego z tych parametrów ([19], [18]):

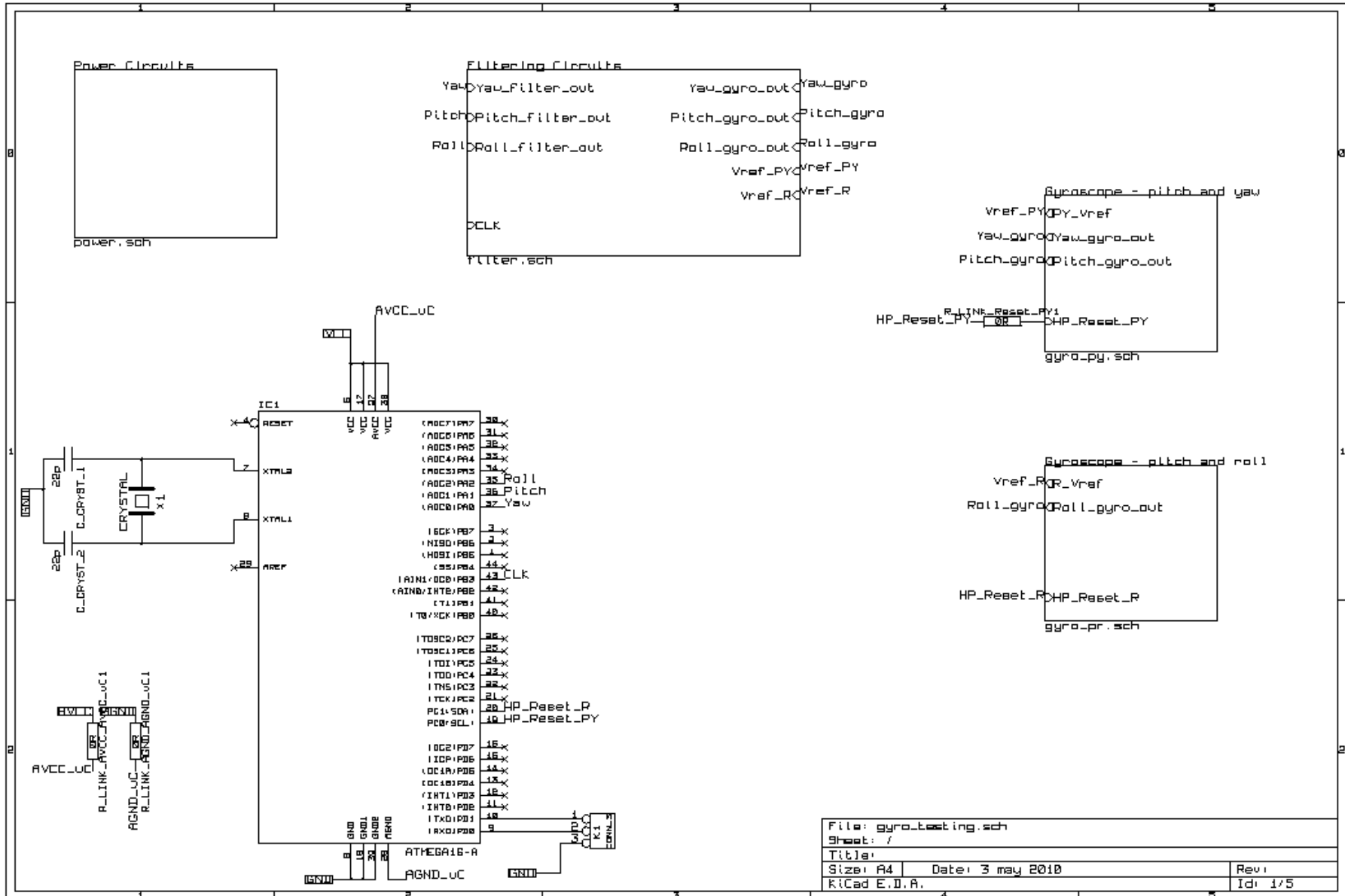
- Maksymalna prędkość obrotowa: ± 500 dps.
- Czułość: $2mV/o$.
- Producent.
Firma ST Microelectronics jest wiodącym producentem czujników inercyjnych [20]. Jako że oferuje wiele podobnych czujników o różnych zakresie i czułości, możliwe jest zaprojektowanie takiego układu IMU, w którym można umieścić sensory o różnych parametrach w zależności od potrzeb.

3.2 Realizacja układu do badania żyroskopów

Za cel postawiono realizację 3-osiowego układu żyroskopowego, na którym można by zaobserwować działanie układu akwizycji, filtracji i przesyłu danych.

3.2.1 Projekt układu

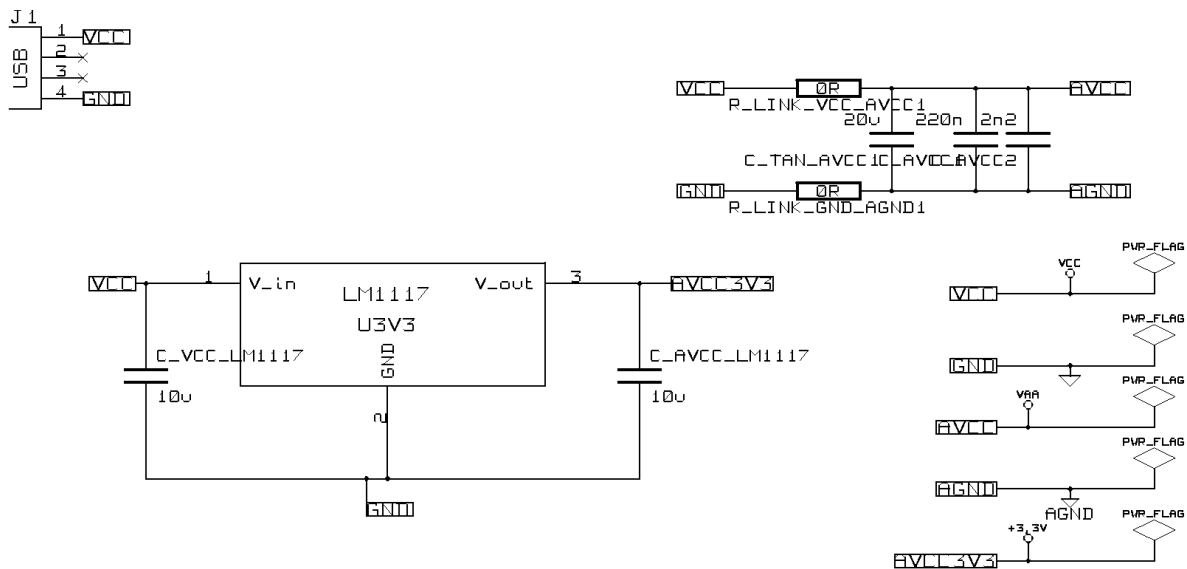
Ogólna struktura układu Na rysunku 14 przedstawiono ogólną strukturę całości układu, w której wyróżnić można podukłady (omówione dalej). Działaniem całego układu steruje mikrokontroler ATmega16L. Wykorzystane w nim są 3 kanały przetwarzania analogowo-cyfrowego, do których doprowadzono sygnał z żyroskopów (po poddaniu filtracji). Celem działania mikrokontrolera jest zbieranie danych z przetwornika, przetwarzanie ich oraz wysyłanie do komputera PC. Ta ostatnia czynność zrealizowana ma być za pomocą protokołu transmisji szeregowej UART.



Rysunek 14: Układ do testowania żyroskopów: całość

Zasilanie układu Na rysunku 15 przedstawiono część układu związaną z zasilaniem. Istotne są tutaj szczególnie:

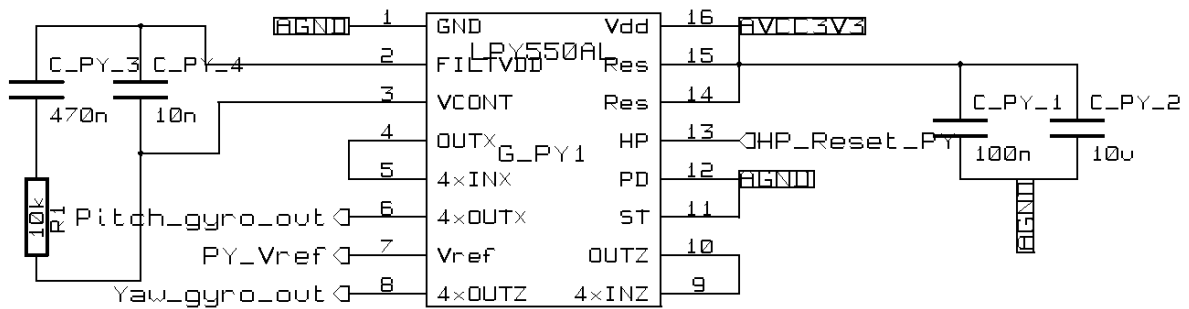
- Stabilizacja napięcia 3,3V, czyli zasilania dla żyroskopów. Realizowane jest przez układ LM1117.
- Właściwe połączenie między zasilaniem układów cyfrowych (VCC-GND) i układów analogowych (AVCC-AGND). Połączenia między tymi sieciami mogą odbywać się tylko z pojedynczych punktach (aby nie tworzyła się tzw. “pętla masy”, przyczyna zakłóceń).



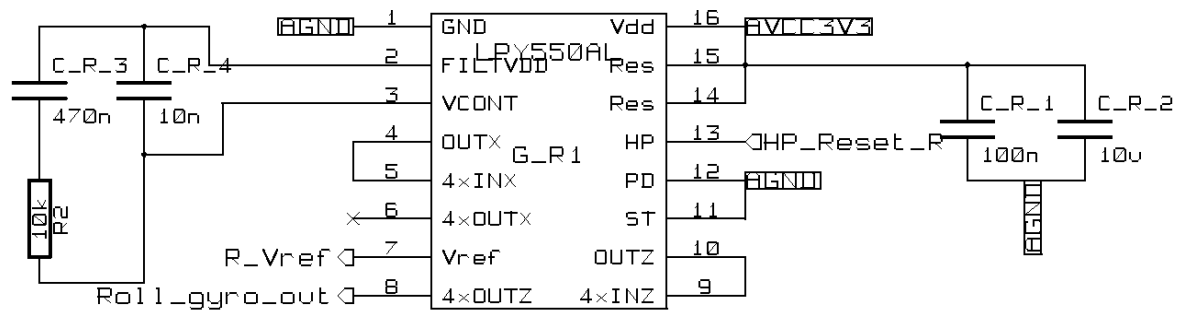
Rysunek 15: Układ do testowania żyroskopów: zasilanie

Akwizycja danych sensorycznych Na rysunkach 16, 17 przedstawiono podukłady związane z żyroskopami, pozyskującymi sygnał związany odpowiednio z osiami Pitch i Yaw oraz Roll.

Zastosowano żyroskopy: LPY550AL (Pitch, Yaw) oraz LPR550AL (Roll). W drugim z wymienionych wykorzystywany jest tylko sygnał Roll (dostępny jest też sygnał Pitch, ale byłby on redundantny względem drugiego żyroskopu). Żyroskopy te posiadają zarówno wyjścia wzmocnione, jak i niewzmocnione. W tym układzie sygnał pobierany jest z wyjść wzmocnionych.



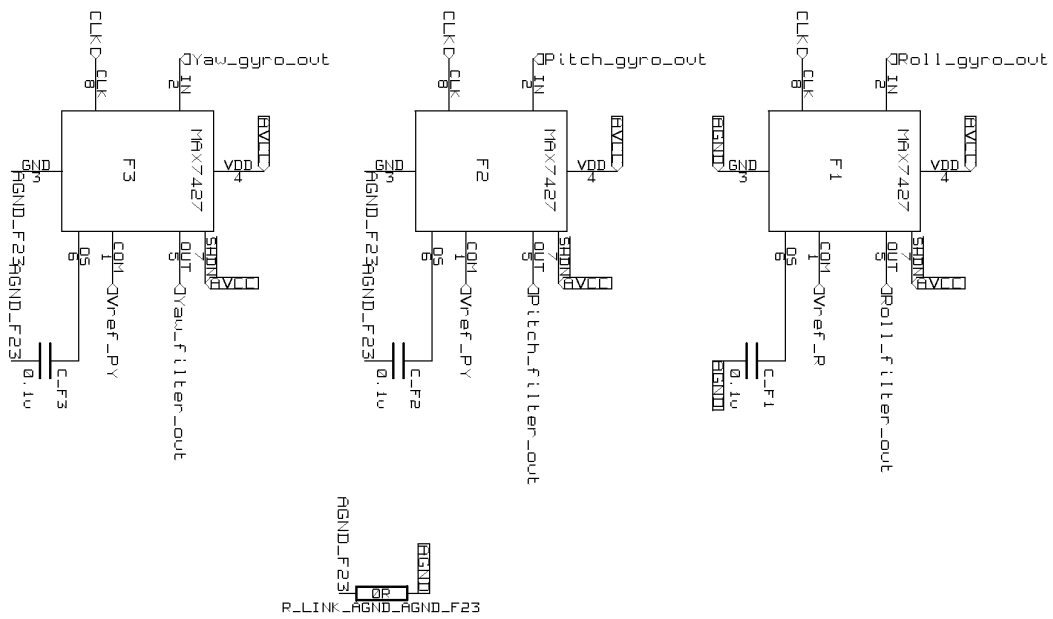
Rysunek 16: Układ do testowania żyroskopów: żyroskop Pitch, Yaw



Rysunek 17: Układ do testowania żyroskopów: żyroskop Roll

Filtracja sygnałów analogowych Na rysunku 18 przedstawiono część układu, realizującą filtrację dolnoprzepustową sygnałów analogowych, których celem jest zapobieganie zjawisku aliasingu.

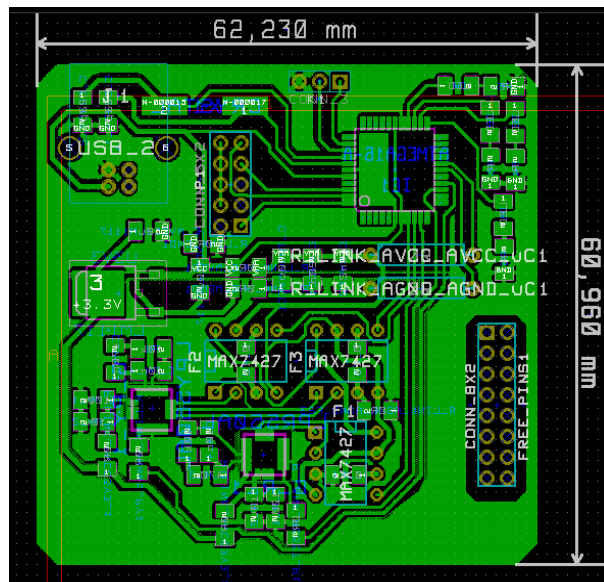
Zastosowano filtry MAX7426 typu switched-capacitor. Zaletą tych filtrów jest możliwość regulacji częstotliwości granicznej za pomocą zewnętrznego sygnału częstotliwościowego. W tym celu doprowadzono do filtrów sygnał CLK z linii PWM mikrokontrolera. Umożliwi to programowe dopasowywanie charakterystyki filtrów. Jest to istotne z punktu widzenia różnych zastosowań modułu IMU.



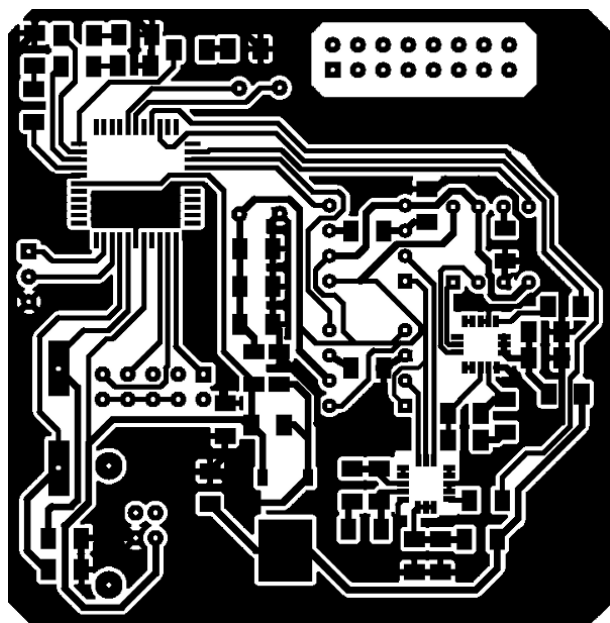
Rysunek 18: Układ do testowania żyroskopów: filtracja sygnału

3.2.2 Projekt płytki drukowanej

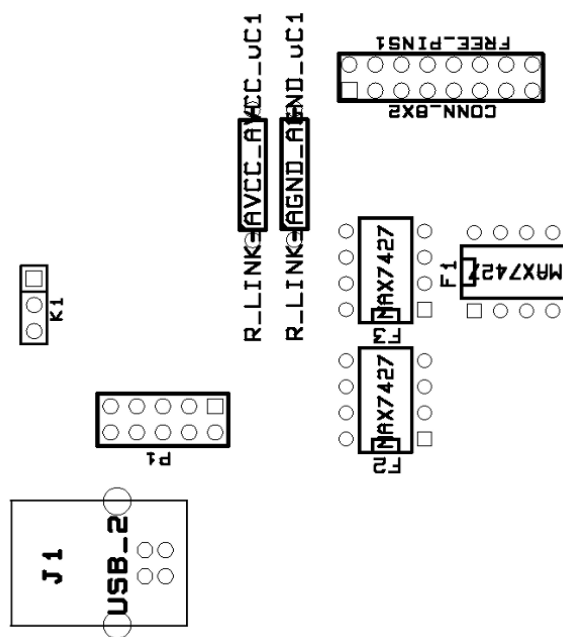
Na rysunku 19 przedstawiono projekt płytki drukowanej, natomiast na rysunku 20 – maskę przeznaczoną do wykonania płytki. Na rysunkach 21 i 22 – rozmieszczenie elementów i układów odpowiednio po stronie elementów (układy w obudowach przewlekanych DIP) i po stronie miedzi (elementy w obudowach SMD).



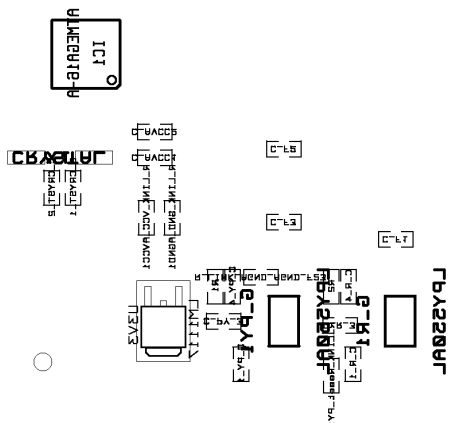
Rysunek 19: Układ do testowania żyroskopów: projekt płytki drukowanej



Rysunek 20: Układ do testowania żyroskopów: maska do wykonania płytki drukowanej



Rysunek 21: Układ do testowania żyroskopów: rozmieszczenie elementów na płytce drukowanej - warstwa elementów



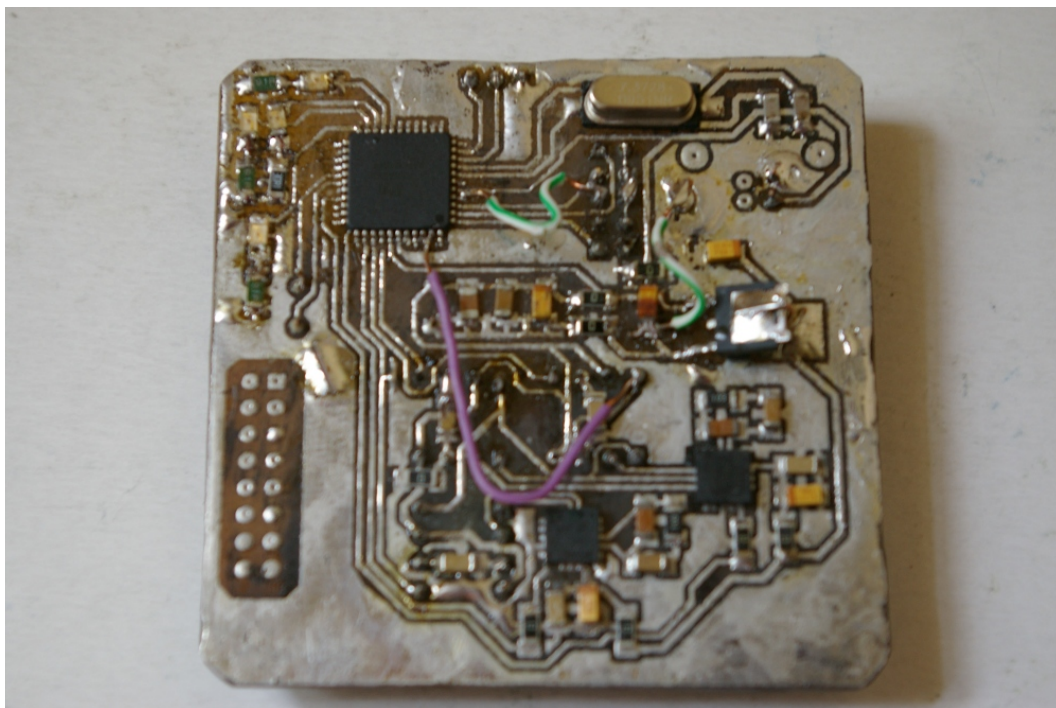
Rysunek 22: Układ do testowania żyroskopów: rozmieszczenie elementów na płytce drukowanej - warstwa miedzi

3.3 Wykonany układ

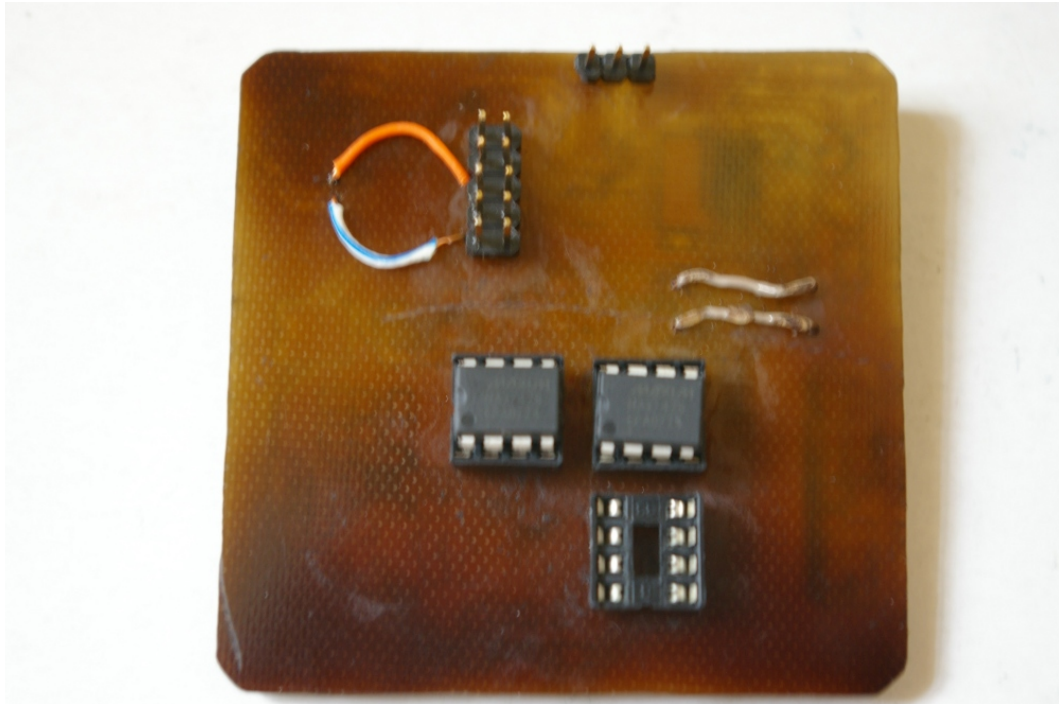
Wykonany został, opisany w raporcie II, moduł testowy.

3.3.1 Wykonany układ

Rysunki 23 oraz 24 przedstawiają wykonany układ.



Rysunek 23: Układ testowy z żyroskopami, widok z góry



Rysunek 24: Układ testowy z żyroskopami, widok z dołu

3.3.2 Oprogramowanie

W układzie zastosowano mikrokontroler ATmega16L, który został oprogramowany w celu prostej wizualizacji danych pozyskiwanych z żyroskopów. W programie generowany jest sygnał PWM, który określa częstotliwość graniczną filtrów dolnoprzepustowych MAX7426 zgodnie ze wzorem: $f_C = \frac{f_{CLK}}{100}$ [13]. Zatem np. sygnał PWM o częstotliwości 1 kHz daje częstotliwość graniczną filtra równą 10 Hz. Programowe ustalenie częstotliwości granicznej zwiększa elastyczność układu z punktu widzenia badań działania żyroskopów, a w dalszej perspektywie – zastosowania w systemie nawigacji inercyjnej INS. Kolejnym zadaniem realizowanym przez program jest akwizycja sygnału z żyroskopów poprzez trzy kanały przetwornika analogowo-cyfrowego. Listing 3 prezentuje konfigurację rejestrów mikrokontrolera.

Listing 3: Konfiguracja rejestrów

```

1      /***** UART                               ****/
2
3      UBRRH = (unsigned char)(UBRR>>8);
4      UBRRL = (unsigned char)UBRR;
5
6      UCSRA = (1<<U2X);
7      UCSRB = (1<<RXEN)|(1<<TXEN);
8      UCSRC = (1<<URSEL)|(3<<UCSZ0);
9
10
11     /***** Analog to Digital comparator ****/
12
13     ADMUX  |= 1 << REFS0 //Vref=AVCC
14            | 1 << ADLAR //left adjust the conversion result

```



```

15         | 1 << MUX0; //ADC1 channel
16
17 ADCSRA |= 1 << ADEN //ADC enable
18         | 1 << ADATE //Auto trigger enable
19         | 1 << ADIE; //AD interrupt enable (free running mode)
20
21 ADCSRA |= 1 << ADSC; //start first conversion
22
23 /*----- */
24
25
26 /***** Pulse Width Modulation *****/
27
28 TCCR0  |= 1 << WGM00 //phase-correct PWM mode
29         | 1 << COM01 //send signal to OCO
30         | 1 << CS00 | 1 << CS02; //clk = clk(I/O)/1024 = 1kHz
31 OCR0   = 0x7f; //50% fill
32 DDRB  |= 0x04; //output
33
34 /*----- */

```

3.3.3 Działanie układu

Obserwację działania sensorów umożliwiają zamontowane na płycie diody, które sygnalizują zmiany sygnału wyjściowego informującego o prędkości kątowej wokół jednej z osi (Yaw). Ponadto zrealizowano komunikację układu z komputerem za pośrednictwem protokołu UART.

Weryfikacja działania sensorów wypadła negatywnie. Na wyjściu zaobserwowano efekt niestabilności punktu zerowego oraz wysoki poziom zakłóceń. Poniżej omówiono możliwe przyczyny wadliwego działania sensorów.

- Nieprawidłowy montaż układu. Układ lutowany był metodą polegającą na rozgrzewaniu całej powierzchni płytki od spodu po uprzednim pokryciu pól lutowniczych cyną i położeniu na nich układów. Wybór tej metody wymuszony był rodzajem obudowy (LGA16), w której producent umieścił żyroskopy. Trudność takiego montażu polega na tym, iż pola lutownicze umieszczone są pod obudową i niewidoczne po przyłutowaniu, zatem trudno sprawdzić, czy układ przyłutowany jest właściwie.
- Uszkodzenie termiczne układów, spowodowane wysoką temperaturą montażu.
- Obecność zakłóceń. Możliwe, iż sygnały i/lub napięcie zasilania na płycie nie jest prawidłowo filtrowane, choć na etapie projektowania dołożono wszelkich starań, aby filtracja była wystarczająca.

4 Kompas - moduł testowy i badania

Dora Sumińska

4.1 Czujniki pola magnetycznego w modułach IMU

Dora Sumińska

4.1.1 Rodzaje czujników pola magnetycznego

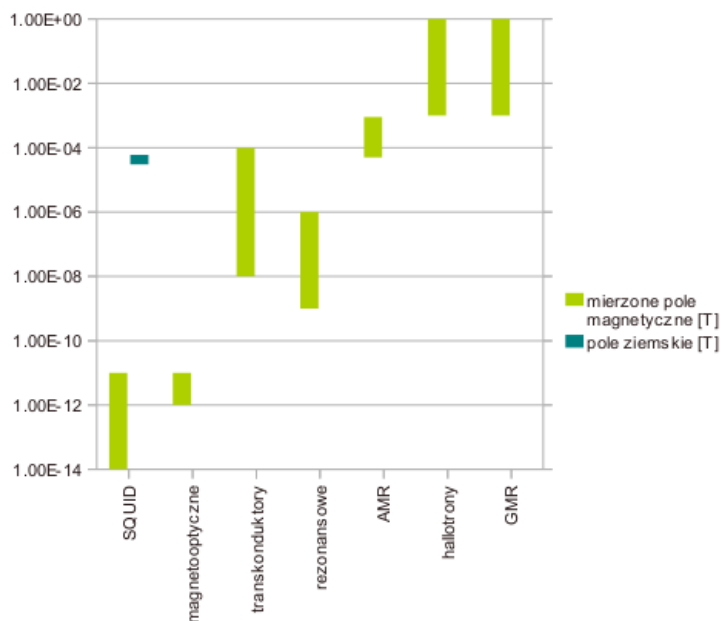
Obecnie na rynku dostępnych jest bardzo wiele czujników pola magnetycznego stanowiących najważniejszą część składową kompasu elektronicznego. Należy także zauważyć, że jest to dziedzina rozwijająca się bardzo dynamicznie (zwłaszcza w zakresie rozwiązań magnetorezystancyjnych). Spośród najbardziej popularnych na rynku czujników można wyróżnić dziewięć podstawowych rodzajów, których zasada działania opiera się na zróżnicowanych zjawiskach fizycznych [22]:

- *Indukcyjne* - wykorzystują prawo Farady'a, najprostsze do wykonania, o najszerszym polu zastosowań, przeprowadzają pomiar jedynie sygnałów przemiennych, wykazują stosunkowo małą czułość. Dodatkowym mankamentem tego typu rozwiązania jest zależność sygnału wyjściowego od pochodnej zmiennego parametru - indukcji pola B, co wymusza zastosowanie układu całkującego, które jest przyczyną dużych niedokładności.
- *Transkonduktorowe* - polega na wytwarzaniu napięcia wtórnego w rdzeniu ferromagnetycznym, służą do wykrywania stosunkowo małych pól magnetycznych (w tych zakresach posiada charakterystykę liniową [16] i mały błąd pomiarowy - w granicach 2%). W precyzyjnie wykonanych konstrukcjach sygnał wyjściowy bardzo łatwy do odszumienia.
- *Czujnik nadprzewodnikowy SQUID* - pomiar napięcia na złączu Josephson'a wytwarzany pod wpływem działania strumienia pola magnetycznego otoczonego pierścieniem przez, który przepływa prąd o odpowiednim natężeniu. Rozwiązanie niezwykle czułe, o którego rozdzielczości decydują szумы i dokładność konstrukcji.
- *Czujnik rezonansowy* - pomiar napięcia indukowanego w cewce zanurzonej w spolaryzowanej cieczy (0,5 - 1l). Duża rozdzielczość i dokładność osiągnięta przy pomiarze pola magnetycznego przegrywa w porównaniu z rozmiarami czujnika i faktem, iż mierzony jest jedynie moduł badanego pola magnetycznego.
- *Czujniki magnetorezystancyjne AMR* - zasada działania opiera się na anizotropowym zjawisku magnetorezystancyjnym występującym w konstrukcjach czujników cienkowarstwowych. Polega ono na zmianie rezystancji zależnej od kąta między kierunkiem pola magnetycznego a przepływającym prądem. Często łączy się cztery magnetorezystywy w układ mostka, w którym wartością mierzoną jest zmiana napięcia.
- *Czujniki magnetorezystancyjne GMR* - wykorzystuje zjawisko opisane powyżej. Czujnik składa się z dwóch warstw czujników przedzielonych warstwą przeodzącą, początkowo namagnesowanymi antyrównolegle. Po umieszczeniu GMR w polu magnetycznym następuje równoległe namagnesowanie przekładek, któremu towarzyszy znaczna zmiana rezystancji (do kilkuset procent). Wadą tego rozwiązania jest potrzeba dużego pola magnetycznego co wiąże się z małą czułością.

- *Czujnik typu GMI* - wykorzystywana jest zmiana impedancji w cienkiej warstwie drutu zasilanego prądem o wysokiej częstotliwości (efekt naskórkowy i zmiana przenikalności materiału magnetycznego). Reaguje zmianą napięcia wyjściowego rzędu kilkuset % już w niewielkim polu magnetycznym. Dodatkową zaletą są niskie koszty wykonanych tą metodą czujników.
- *Hallotrony* - opierają się na efekcie Halla - zmiana potencjału w elemencie umieszczonym w polu magnetycznym przez, który przepływa prąd. Za tego typu rozwiązaniami przemawiają jej prostota konstrukcji, rozmiar i łatwość w integracji z innymi modułami elektronicznymi. Do zasadniczych wad należą podatność na czynniki temperaturowe (w związku z tym koszty ich eliminacji), mała czułość.
- *Czujniki magnetoptyczne* - wykorzystuje zjawisko Kerra (zmiana kąta odbicia światła) lub Farrady'ego (skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła). Mierzoną wartością jest zmiana drogi światła w światłowodzie osadzonym w materiale magnetoelastycznym. Głównym obszarem zastosowań jest przemysł militarny.

Oprócz powyższych, dostępne są także czujniki kontaktronowe, których działanie w dużym uproszczeniu opiera się na styku dwóch prętów umieszczonych wewnątrz szklanej bańki pod wpływem występującego pola. Jednak w powyższej analizie zostały one pominięte ze względu na bardzo mały zakres pomiarowy - rzędu kilku mili T [8].

Spośród powyżej przedstawionych czujników wybrano siedem najbardziej popularnych i zestawiono obszar ich powszechnego zastosowania [22].



Rysunek 25: Zestawienie obszarów zastosowań analizowanych czujników.

4.1.2 Kompas elektroniczny - analiza zastosowania czujników

Analizując graf 25 można zauważyć, że zakresy zastosowań czujników AMR i transkonduktów najściślej pokrywają się z wartością pola magnetycznego 30-60 T.

Czujniki tanskonduktorowe mają zasadniczą zaletę - sygnał wartościowy można bardzo odflitować z szumów i temperaturowego pełzania zera [22]. Dodatkowo są to układy dedykowane pomiarom pola magnetycznego ziemi ze względu na większą stabilność generowanych pomiarów w odróżnieniu od powszechnie stosowanych hallotronów czy czujników z rodziny MR [12]. Omawiany model transkonduktora FLC-70 jest zintegrowanym układem trójosiowym o bardzo dużej dokładności ok.1% przy pomiarze rzędu mili T. Jest to rozwiązanie bardzo atrakcyjne z punktu widzenia jego prawdopodobnego wykorzystania - sterowanie quadrokopterem ze względu niewielki pobór prądu do 6mA i temperaturę pracy do 125 stopni C. Mankamentami przekreślającymi możliwość zakupu czujnika transkonduktorowego jest ich rozmiar (do 51mm długości) i ogólny brak dostępności na Polskim rynku.

Do jednych z najbardziej rozpowszechnionych czujników magnetycznych należą czujniki KMZ produkowane przez firmę Philips [22][5]. Warto także wspomnieć o małych rozmiarach tego układu i prostocie integracji z innymi modułami elektronicznymi. Wśród dostępnych KMZ największą czułością wykazuje się model B [14].

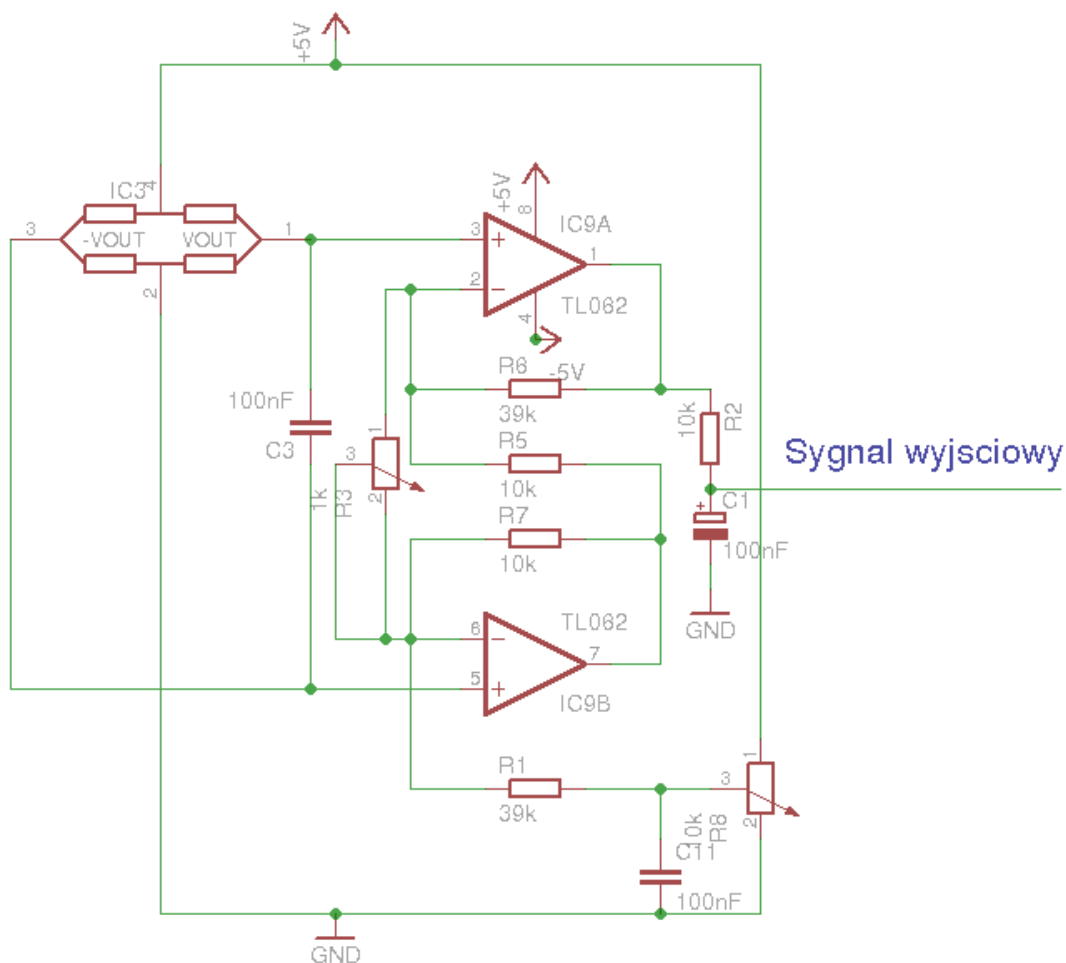
4.2 Kompas elektroniczny w zastosowaniu IMU - moduł testowy

Dora Sumińska

4.2.1 Realizacja układu sensorycznego

Układ został wyposażony w czujnik pola magnetycznego firmy Philips model KMZ10B. Na wyjściu czujnika jest generowane napięcie różnicowe, które przy zmianie kierunku pola ulega modyfikacji[14]. Aby dokładnie określić zależność tego sygnału od warunków zewnętrznych należy przeprowadzić jeszcze szereg testów w różnych punktach geograficznych. Warto byłoby także zbadać wpływ linii wysokiego napięcia na błędy pomiarowe. Niestety tego etapu nie przeprowadzono ze względu na brak zasilania bateryjnego (oczekiwanie na realizację zamówienia) umożliwiającego nieograniczone przemieszczanie modułu. Sygnał wychodzący bezpośrednio z sensora jest podawany na wejście układu scalonego TL062CN w konfiguracji połączeń służącej do pomiarów. Zastosowany wzmacniacz operacyjny nie jest typu rail-rail i wymaga symetrycznego napięcia zasilającego[11]. W celu odwrócenia napięcia użyto układu ICL7660 w podstawowej konfiguracji – piny BOOST (brak multiplikowania częstotliwości oscylatora przez wartość 6) , LV (*Low Voltage Operation* napięcie zasilające powyżej 3.5V) oraz OSC (brak oscylatora zewnętrznego) pozostają niepodłączone [15]. Jako kondensator bypass użyto elektrolitu o wartości jednego mikro farada. Schemat tej części układu ze względu na dokładne dobranie elementów dopasowanych bezpośrednio do możliwości czujnika KMZ10B został

opublikowany w dokumentacji zestawu do samodzielnego montażu 164-K opublikowanego na łamach czasopisma Nowy Elektronik[9].



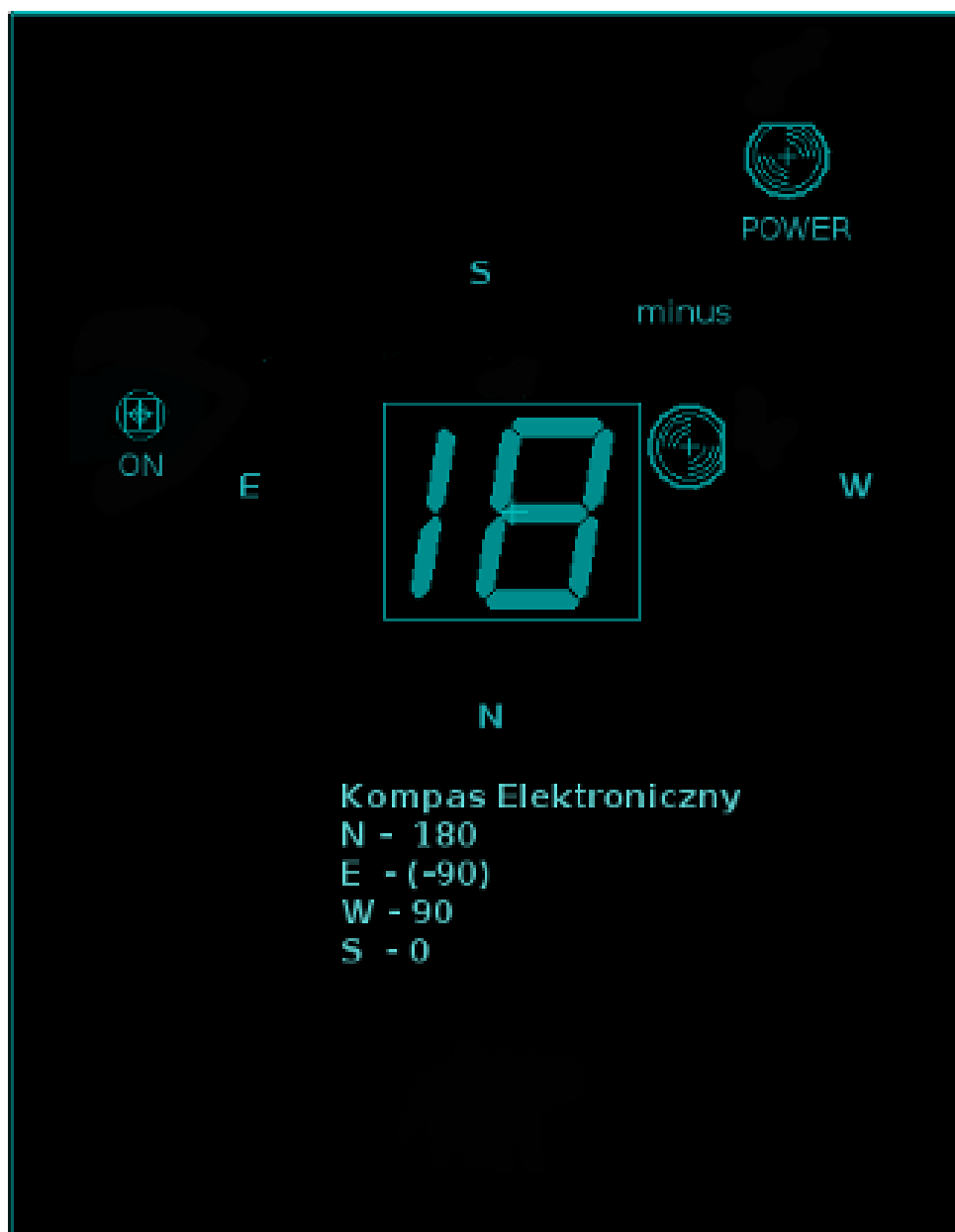
Rysunek 26: Schemat modułu sensora z uwzględnieniem sygnału wyjściowego

Na powyższym schemacie 26 pokazano także dwa potencjometry służące do odpowiedniego wyregulowania układu pomiarowego. R8 służy do dokładnego osiągnięcia na nim spadku napięcia o 1.5V. Po wykonaniu tego zadania można przystąpić do dalszej regulacji układu przy pomocy potencjometru R3 modyfikującego wzmocnienie. Należy go ustawić w takiej pozycji, aby 0 na wyświetlaczu pokrywało się z osiągnięciem przez drugi już wyregulowany kompas dokładnie północnego kierunku.

4.2.2 Sprzężenie zwrotne układu

Wykonany moduł testowy jest wyposażony w wyświetlacz 7-segmentowy 3-cyfrowy (zakres 0-199) i dodatkową diodę sygnalizującą znak odchyłki

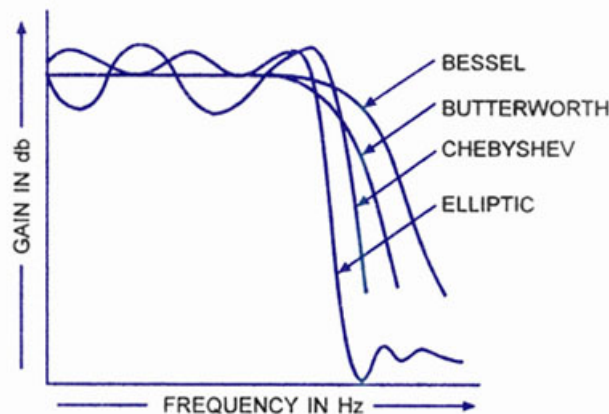
wyrażanej w kątach. Przycisk do załączenia układu do zasilania. W prawym górnym rogu widnieje dioda informująca o działaniu urządzenia. Na panelu operatora znajduje się naklejka 27 informująca o wskazywanych przez kompas kierunkach i krótki listing przykładowych interpretacji wartości liczbowych pokazywanych przez wyświetlacz, a także opisane funkcje diod i przycisku.



Rysunek 27: Naklejka na panelu

4.2.3 Filtracja

W układzie przedstawionym na schemacie 26 zaraz przed uzyskaniem ostatecznego sygnału wyjściowego umieszczony został prosty filtr dolno-przepustowy RC. Jest to jednak nie dość dokładne rozwiązanie problemu aliasingu i wysokoczęstotliwościowych szumów pochodzących z czujnika. Dlatego też zdecydowano się na użycie filtra analogowego eliptycznego 5-biegunowego firmy Maxim MAX7426 o optymalnie stromym zboczach w paśmie przejściowym[13]. Układy tego typu charakteryzują się bardzo małym stosunkiem przejścia z pasma przenoszenia do pasma zaporowego $r = 1.25$ oraz dużym tłumieniem sygnałów powyżej częstotliwości odcięcia [23]. Nazwa ich pochodzi od realizowanej przez nie funkcji eliptycznej Jacobiego. Są to układy, których widmo amplitudowe jest w tej klasie filtrów (Butterworth, ChebyshevI, ChebyshevII) najbardziej zbliżone do ideału - pionowych zboczy 28.



Rysunek 28: Odpowiedź częstotliwościowa filtru MAX7426

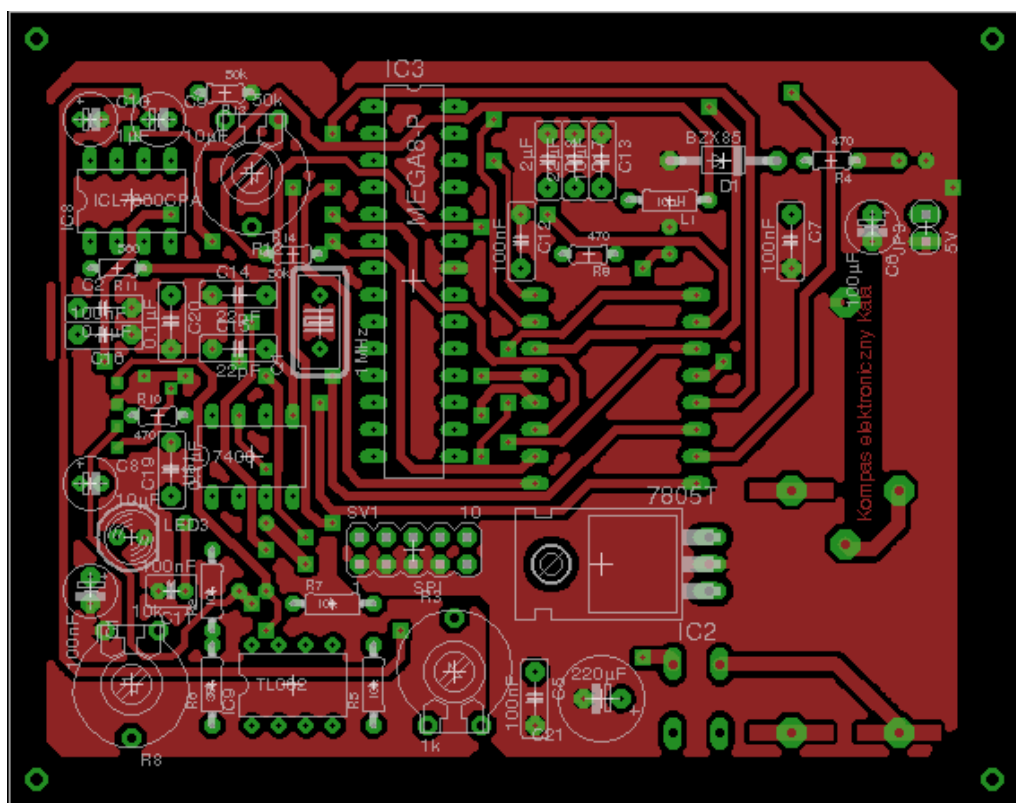
Filtry eliptyczne charakteryzują się ponadto stałą amplitudą oscylacji charakterystyki amplitudowej zarówno w paśmie zaporowym jak i w paśmie przepustowym, jednak trzeba się także liczyć z kosztami takich udogodnień. Otóż układy takie wprowadzają stosunkowo duże zakłócenia fazowe. Mankament ten nie przekreśla jednak słuszności dokonanego wyboru. W zastosowaniu konstruowanego modułu testowego filtracja służy głównie do odcięcia sygnałów szpilek szumu i eliminacji zjawiska aliasingu. Zastosowany filtr MAX7426 jest w stanie z powodzeniem sprostać tym wymaganiom.

4.2.4 Schemat całego modułu

Poniżej przedstawiono schemat wykonanego układu testowego czujnika pola magnetycznego KMZ10B.

Jednostką centralną układu jest ATmega8L. Spełnia ona wszystkie postawione przed układem wymagania:

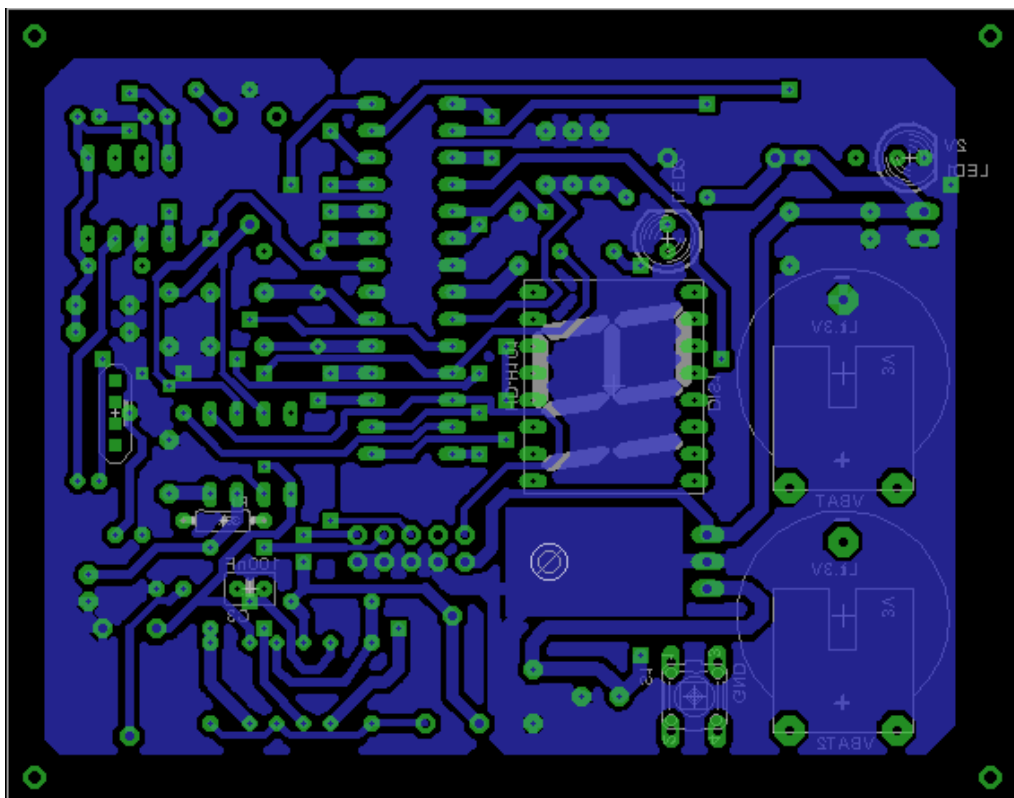
- 23 programowalne porty (do sterowania wyświetlaczem użyto 15 wyjść) [6]
- 8-bitowy Timer z osobnym preskalerem
- kwarc wewnętrzny 0-8 MHz
- przetwornik analogowo-cyfrowy z 10-bitową rozdzielczością
- napięcie operacyjne 2.7-5.5 V
- możliwość programowania 8kB wewnętrznej pamięci programu typu FLASH bezpośrednio w module, poprzez interfejs ISP



Rysunek 30: Płytką top view

Ze względu na liczbę portów wykorzystanych do obsługi wyświetlacza zdecydowano się na wykonanie płytki dwustronnej. Należy zauważyć, że powierzchnia TOP została przeznaczona do komunikacji z użytkownikiem - są na niej umieszczone diody kontrolne (LED1 sygnalizuje podłączenie

układu do zasilania LED2 wykorzystywana jest do ustalania znaku odchyłki od kierunku północ-południe), wyświetlacz 7-segmentowy oraz przycisk załączający. Pod ubudową po tej stronie płytki został także umieszczony czujnik pola. Ze względu na brak dostępności zdecydowano się na użycie mniej popularnej wersji ATmegi8.



Rysunek 31: Płytką bottom view

4.3 Kompas elektroniczny - moduł testowy

Dora Sumińska

Celem wykonanego projektu było zrealizowanie kompasu elektronicznego 2-osiowego służącego do wyznaczania odchylenia od kierunku północnego. W układzie zastosowano tylko jeden czujnik KMZ10B firmy Philips, z tego względu należy go obracać zawsze w jedną określoną stronę (zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara), aby generowany na wyświetlaczu odczyt był jednoznaczny. Stosując się do powyższego zalecenia położenie kompasu w skrajnych kierunkach ma odpowiadać odczytom: północny – 0, wschodni – 90, południowy – 180, zachodni – (-90). Należy jednakże brać pod uwagę, iż zaproponowany układ jest wersją prototypową i jego

dokładność jest ograniczona.

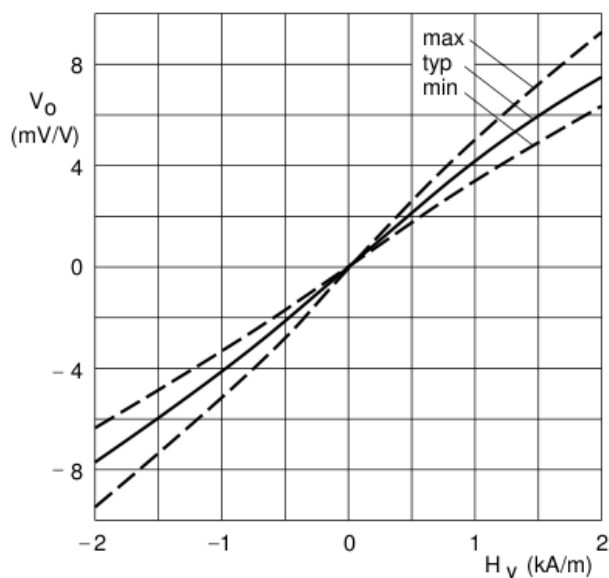
4.3.1 Opis wykonanego urządzenia

Sensoryka Do pomiaru pola magnetycznego zastosowano [14] czujnik firmy Philips. Głównymi argumentami przemawiającymi za wykorzystania tego typu czujników jest jego dostępność, prostota działania, a także niskie koszty jego produkcji. Jest to czujnik typu Barber-Pole AMR ¹, którego konstrukcja opiera się na zastosowaniu cienkiej warstwy permalloy'u ² [14] zmieniającej rezystancję pod wpływem zmiennego pola magnetycznego H_x , w którym sensor się znalazł. Istotnie, H_x jest skierowane prostopadle do płaszczyzny permalloy'u powodując obrót wektora namagnesowania [22]. Zależność zmiany rezystancji $\frac{\Delta R}{R}$ od pola zewnętrznego jest wyrażona wzorem:

$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{\Delta\rho}{\rho} \left(\frac{H_x}{H_y + H_k} \right)^2$$

,gdzie: H_x – składowa pola prostopadła do osi paska, H_y – składowa pola wzdłuż osi paska, H_k – pole anizotropii.

Na wyjściu czujnika otrzymywaną wartością jest napięcie różnicowe mierzone między pinami V_{out} i $-V_{out}$. Jego charakterystyka, przy zmiennym polu H_y została przedstawiona na wykresie 32. Ze względu na fakt, iż



Rysunek 32: Charakterystyka wyjściowa czujnika KMZ10B.

¹Anisotropic Magnetoresistive Phenomenon

²stop 80/20 niklu i żelaza

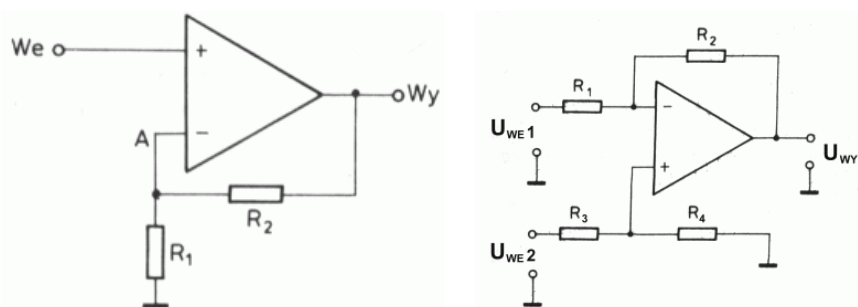
składowa pozioma pola ziemskiego w Polsce waha się w okolicach $20\mu T$ i w przeliczeniu na kA/m wartość ta nie przekracza $15.92e^{-3}$, zmiany napięcia wyjściowego powinny być rzędu $1mV$. Przewidywania te pokrywają się z wynikami uzyskanymi podczas testowania czujnika KMZ10B przedstawionymi w tabeli 1.

Kąt odchylenia od kierunku N α	napięcie różnicowe ΔU_{out}
0°	-0.9
45°	-0.5
90°	-0.1
135°	0.5
180°	1.2
225°	0.6
270°	-0.1
315°	-0.6
360°	-0.9

Tablica 1: Wyniki pomiarów napięcia wyjściowego w czujniku pola magnetycznego.

Pomiar był wykonany przy założeniu, że wartość napięcia minimalnego wskazuje dokładnie kierunek północny. Ze względu na wykonanie pomiaru w pomieszczeniu zamkniętym, może być on obarczony dużą niedokładnością wynikającą z obecności przewodów elektrycznych w ścianach, a także sprzętów elektronicznych znajdujących się w odległości nie mniejszej niż $2m$ w otoczeniu sensora [9].

Układ podwójnego wzmacniacza Ze względu na wymagania przetwornika ADC [6], wartość sygnału wyjściowego z sensora należało wzmocnić do wartości kilku volt i przesunąć do wartości dodatnich. W pierwszym kroku zrealizowano drugie z wymienionych zadań. W celu przesunięcia sygnału zastosowano układ wzmacniacza nieodraczającego przedstawionego na 33(a), na wyjściu otrzymując wartości napięcia z zakresu (16 mV, 84mV).



(a) przesunięcie sygnału do przestrzeni wartości dodatnich (b) wzmocnienie wartości sygnału wartości dodatnich

Rysunek 33: Podwójny wzmacniacz sygnału.

Rezystory R_1 i R_2 dobrano tak, aby uzyskać przesunięcie jak najbliższe wartości 0 – $R_1 = 150\Omega$ i $R_2 = 4.6k\Omega$. W ten sposób uzyskano wzmocnienie równe [10]:

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{4750}{150} = 31.7$$

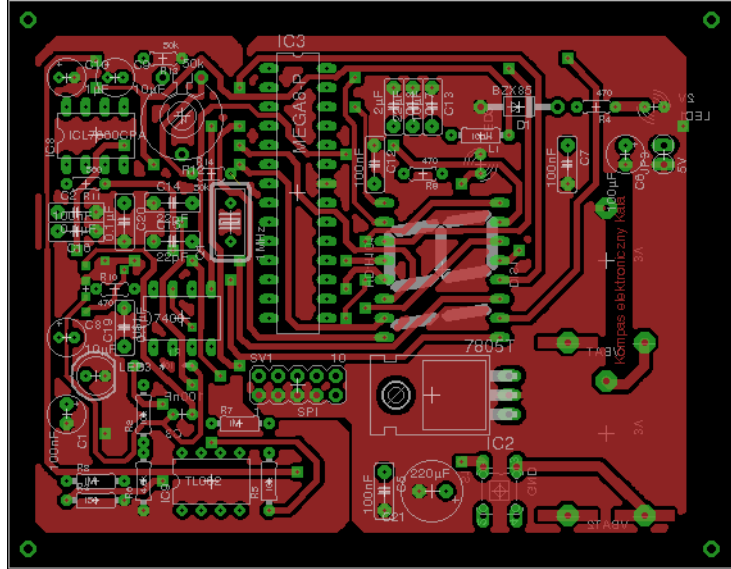
Co potwierdzają zmierzone wyniki $(1.2 + | - 0.9|)31.7 = 2.1mV31.7 = 66.6mV$. Kolejnym krokiem było wzmocnienie otrzymanego napięcia do rzędu kilku Volt. W tym celu zastosowano układ 33(b). Rezystory dobrano tak, aby impedancja wewnętrzna układu nie była zbyt niska, a jednocześnie gwarantowała satysfakcjonujący współczynnik wzmocnienia k [10]. I tak kolejno dobrano parami wartości rezystancji R_1 i $R_3 = 10k\Omega$ i R_2 i $R_4 = 1M\Omega$. Otrzymaony w ten sposób k wynosi:

$$k = \frac{U_{we}}{(U_{we1} - U_{we2})} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{1M\Omega}{10k\Omega} = 100$$

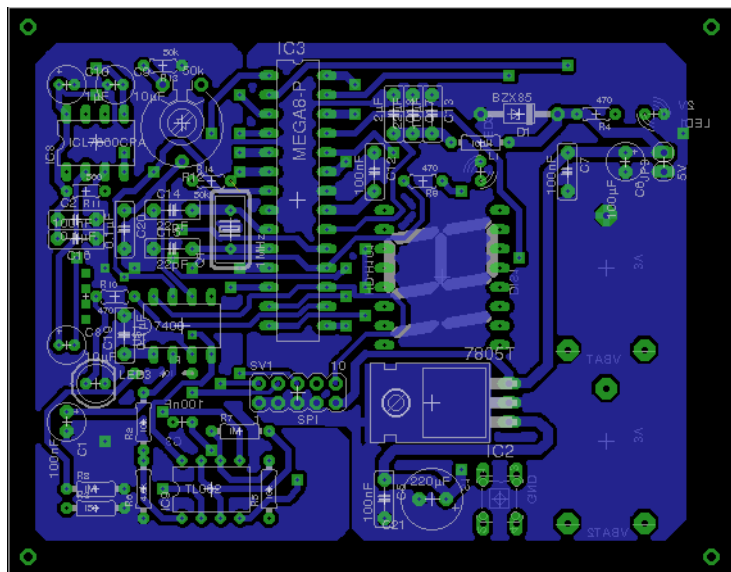
Wyliczona wartość wzmocnienia jest jednak w rzeczywistym układzie nieco niższa. W ten sposób uzyskano na wyjściu obu wzmacniaczy wartości z zakresu (0.3-3.93V).

Schemat modułu Schemat wykonanego układu testowego czujnika pola magnetycznego KMZ10B przedstawiono na rysunku 36.

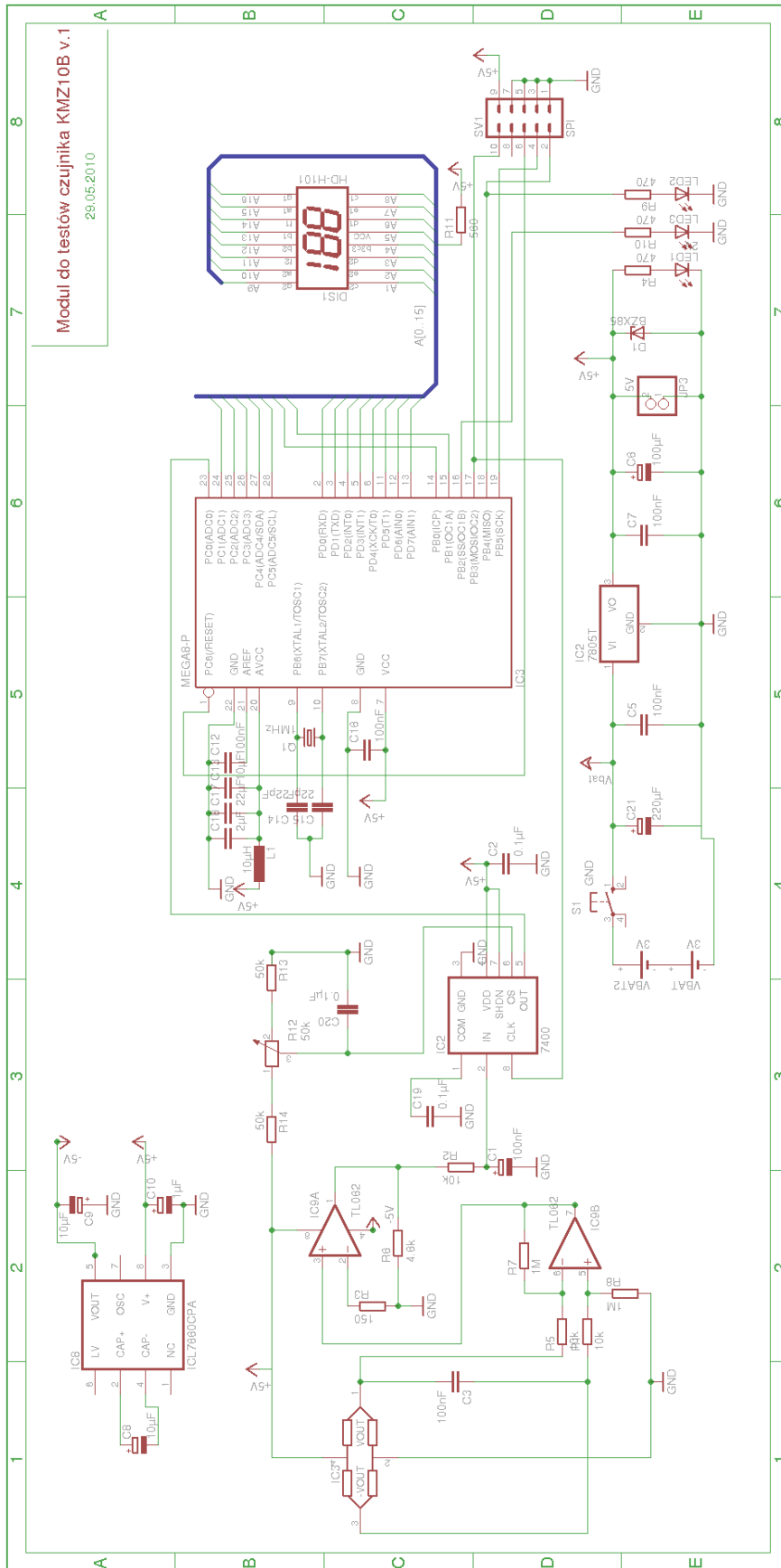
Projekt wykonanej płytki dwustronnej PCB.



Rysunek 34: Płytką top view



Rysunek 35: Płytką bottom view



Rysunek 36: Schemat modułu testowego.

5 IMU - koncepcja ogólna

5.1 Projekt modułu IMU

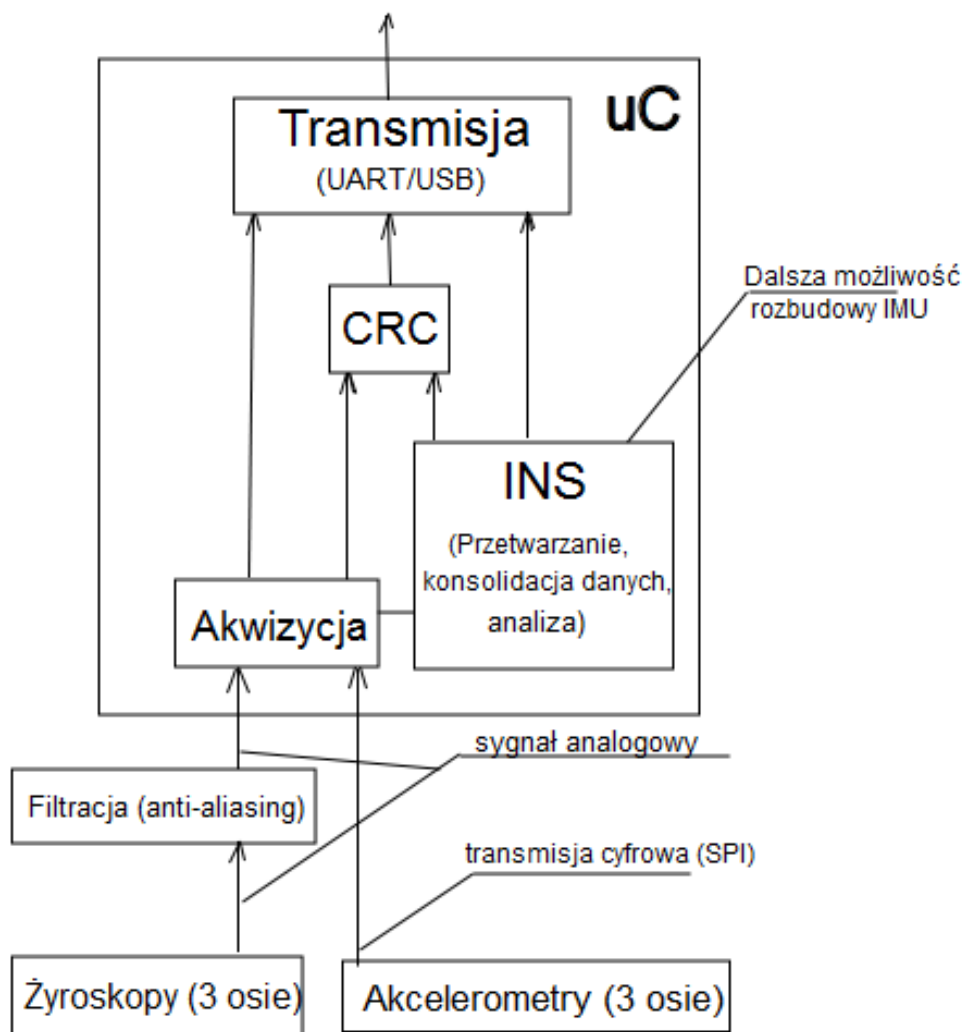
Celem wykonania opisanych wyżej układów było zbadanie sensorów, a następnie zaprojektowanie inercyjnego modułu pomiarowego IMU, w którego skład mają wejść. W zamierzeniu moduł IMU powinien posiadać 6 stopni swobody:

1. pomiar przyspieszeń liniowych w 3 osiach (akcelerometry MEMS);
2. pomiar prędkości kątowych w 3 osiach (żyroskopy MEMS);
3. pomiar orientacji w 3 płaszczyznach (kompasy elektroniczne).

Punkt 3, jako że jest realizowany przez kompas, nie realizuje pomiarów natury inercyjnej. Jego uwzględnienie jest natomiast zasadne z punktu widzenia szeroko pojętej nawigacji.

5.1.1 Ogólna struktura układu

Schemat układu wykonano w programie KiCAD, oprócz podukładu z kompasem, który został wykonany w darmowej wersji programu EAGLE. Docelowo cały układ ma być przeniesiony do programu KiCAD. Schemat zbudowany jest na zasadzie podukładów umieszczonych wewnątrz schematu nadrzędnego. Na rysunku 37 przedstawiono strukturę całego układu.



Rysunek 37: IMU: Ogólna struktura układu

5.1.2 Podukład z mikrokontrolerem

Układ sterowany jest za pomocą mikrokontrolera AT32UC3B0256 z rodziny AVR32. Mikrokontroler ma wypełnić następujące zadania:

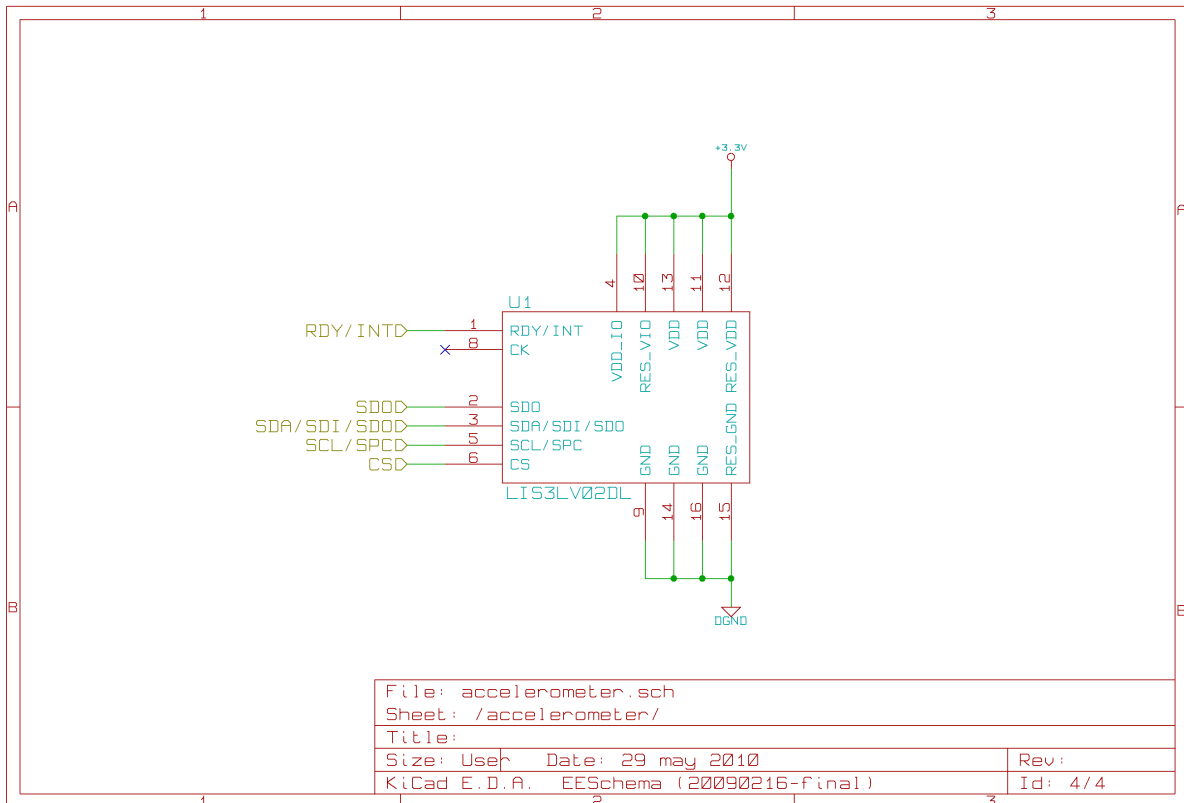
1. akwizycja danych z akcelerometrów, żyroskopów, kompasów (interfejs ISP, przetwarzanie analogowo-cyfrowe);
2. wstępne przetwarzanie i cyfrowa filtracja danych;
3. zaawansowane przetwarzanie danych (wyznaczanie przyspieszeń, prędkości, współrzędnych).

W realizacji zadania 3 korzystnym wydaje się fakt, iż w jednostce centralnej mikrokontrolera AT32UC3B0256 dostępne są dodatkowe rozkazy,

służące do cyfrowego przetwarzania danych, stosowane w procesorach sygnałowych.

5.1.3 Podukład z akcelerometrem cyfrowym

Adrian Ciż



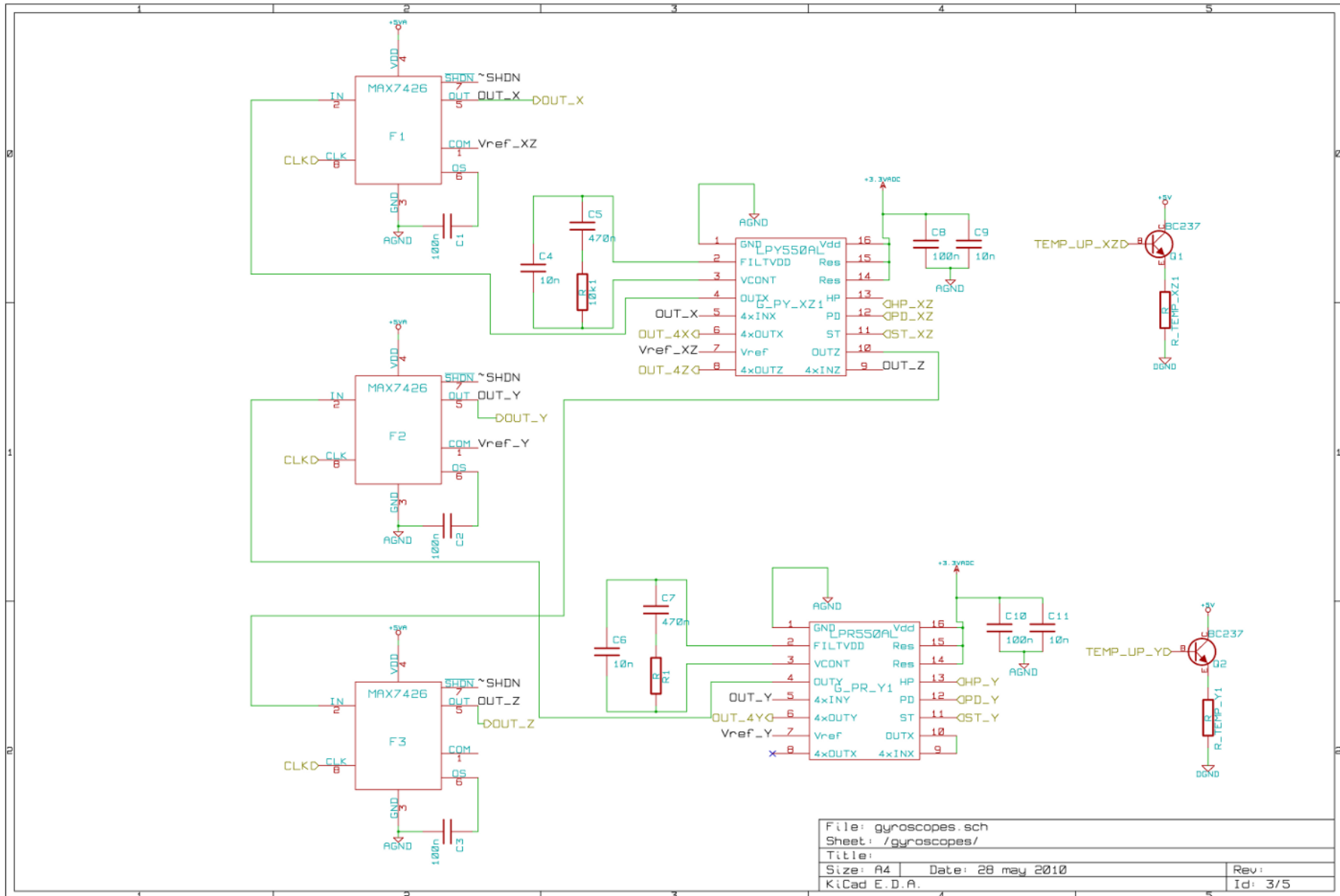
Rysunek 39: IMU: Podukład z akcelerometrem cyfrowym

5.1.4 Podukład z żyroskopami analogowymi

Marek Gulanowski

Zadania tego podukładu, przedstawionego na rysunku 40, obejmują:

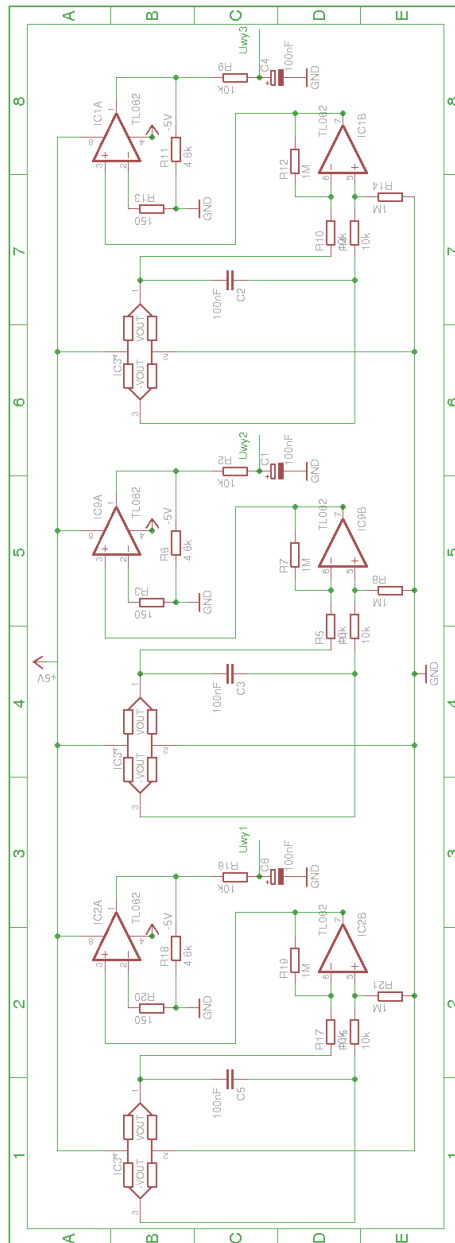
1. generowanie przez żyroskopy sygnału analogowego proporcjonalnego do prędkości obrotowych w poszczególnych osiach;
2. filtrowanie sygnału przez układy MAX7426 (5-biegunowe);
3. sygnał wyjściowy: filtrowany sygnał oraz ten sam sygnał wzmacniony 4-krotnie;
4. stabilizacja temperatury pracy żyroskopów za pomocą rezystorów w celu ograniczenia zjawiska niestabilności punktu zerowego.



Rysunek 40: IMU: Podukład z żyroskopami analogowymi

5.1.5 Podukład z kompasem

Jak wspomniano powyżej, w skład modułu ma wejść także kompas elektroniczny. Nie jest on jednak przedmiotem niniejszego projektu. Dla zachowania kompletności obrazu zaprezentowano tu jednak na rysunku 41 schemat podukładu z kompasem. Został on zaprojektowany przez Dorę Sumisławską.



Rysunek 41: IMU: Podukład z kompasem

5.2 Wnioski

Przedstawiony projekt układu należy traktować jako nieostateczny. Jest on jednak na tyle zaawansowany, że może stanowić przydatny punkt wyjścia do rzeczywistej realizacji układu. W takim przypadku należałoby ostatecznie zweryfikować poprawność przedstawionych schematów oraz zaprojektować i wykonać obwody drukowane.

Zaletą zaproponowanych powyżej rozwiązań jest ich prostota. Dzięki temu, przy odpowiednim projekcie płytki drukowanej, możliwe jest wykonanie modułu IMU w warunkach amatorskich. Z punktu widzenia liczby stopni swobody jest to pełny moduł pomiarów inercyjnych, posiada ich bowiem 6, co pozwala pobierać i przetwarzać dane o translacji i rotacji obiektu. Dodatkowym atutem jest koncepcja wykorzystania kompasów elektronicznych, które pozwolić mają na trójosiowy pomiar orientacji. Wprowadzenie w tego rodzaju module pomiarów natury nieinercyjnej może być bardzo korzystne, biorąc pod uwagę błędy, które zawsze wiążą się z działaniem czujników typu MEMS, w szczególności niestabilność punktu zerowego. Bardzo istotnym czynnikiem, wpływającym silnie na dane otrzymywane z sensorów MEMS, jest temperatura pracy. W profesjonalnych układach typu IMU (INS) stosuje się różne mechanizmy kompensacji niekorzystnych zjawisk termicznych. W powyższym układzie zaproponowano prosty sposób kompensacji temperaturowej, polegający na umieszczeniu w układzie rezystorów, ogrzewających sensory do zadanej temperatury. Nie jest to na pewno sposób wystarczająco dobry do znacznej redukcji błędów, ale w niewielkim stopniu może się do niej przyczynić.

Kolejną zaletą wykonania własnego modułu jest całkowity koszt układu, który w porównaniu z dostępnymi na rynku gotowymi sensorami IMU [3] jest bardzo niski, ponieważ nie przekracza 100\$. Jednocześnie oferując znacznie większe możliwości dalszej rozbudowy niż gotowe rozwiązania IMU, budowanie własnego modułu staje się bardzo rozsądnym wyborem. Różnica cenowa jeszcze bardziej się powiększa przy porównaniu z komercyjnymi rozwiązaniami w dziedzinie INS, które potrafią kosztować nawet kilka tysięcy dolarów. Jednak w tym przypadku za ceną stoi jakość i żadna amatorska konstrukcja nie będzie w stanie osiągnąć takich parametrów jak te zapewniane przez gotowe układy INS.

Jako ogólny wniosek z realizacji projektu można stwierdzić, iż wykazano, że budowa modułu sensorycznego typu IMU w warunkach amatorskich może być opłacalna, należy jednak pamiętać o znacznie niższej dokładno-

ści uzyskiwanych z niego danych od tej, z którą można mieć do czynienia w przypadku modułów produkowanych na skalę przemysłową. Niewątpliwie jednak w pewnych zastosowaniach robotycznych, dla których nie jest niezbędną wysoka dokładność pomiarów lub są one weryfikowalne dzięki informacjom pochodzącym z innych źródeł, taki układ może okazać się użyteczny.

Literatura

- [1] www.analog.com/en/mems/low-g-accelerometers/products/index.html.
- [2] www.freescale.com/webapp/sps/site/taxonomy.jsp?nodeid=01126911184209.
- [3] www.sparkfun.com/commerce/categories.php?c=160.
- [4] www.st.com/stonline/products/families/sensors/accelerometers.htm.
- [5] N. E. 164-K. Kompas elektroniczny. *Nowy Elektronik*, -.
- [6] A. Corporation. ATmega8L Summary, 8-bit with 8K Bytes In-System Programmable Flash. Technical report, Atmel Corporation, 2003.
- [7] A. Corporation. Atmega16l, 8-bit avr(r) microcontroller with 16k bytes in-system programmable flash. Technical report, Atmel Corporation, 2009.
- [8] M. electronic. Micro machined sensors mms-b-2. Technical report, MEDER MMS, 2008.
- [9] N. Elektronik. Zestaw do samodzielnego montażu 164-k. *Press Polska*, 1997.
- [10] W. H. Horowitz P. *Sztuka elektroniki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2003.
- [11] T. I. Incorporated. Tl062 low-power jfet-input operational amplifiers. Technical report, Texas Instruments Incorporated, 2002.
- [12] S. M. Instruments. Magnetic field sensor flc3-70. Technical report, SMI, Dinslaken, Germany, -.
- [13] MAXIM. 5th-order, lowpass, elliptic, switched-capacitor filters. Technical report, MAXIM, 2000.
- [14] Philips. Kmz10b magnetic field sensor. Technical report, Philips, 1998.
- [15] M. I. Products. Ict7660, switched-capacitor voltage converters. Technical report, Maxim Integrated Products, 1994.
- [16] D. Steward. Fluxgate sensor analysis. *Ansoft*, -.
- [17] STMicroelectronics. Lis3lv02dl, mems inertial sensor, 3-axis - $\pm 2g/\pm 6g$ digital output low voltage linear accelerometer. Technical report, STMicroelectronics, 2008.

- [18] STMicroelectronics. Lpr550al. Technical report, STMicroelectronics, 2009.
- [19] STMicroelectronics. Lpy550al. Technical report, STMicroelectronics, 2009.
- [20] STMicroelectronics. Mems gyroscopes: Their main applications, internal structure, working principles. Webseminar, STMicroelectronics, 2010.
- [21] S. H. Stovall. *Basic Inertial Navigation*. Navigation and Data Link Section. Systems Integration Branch. Naval Air Warfare Center Weapons Division, 1997.
- [22] S. Tumański. Czujniki pola magnetycznego – stan obecny i kierunki rozwoju. *Politechnika Warszawska*, -.
- [23] Łukasz Tułacz. Nawigacja robota mobilnego z użyciem czujników inercyjnych. Master's thesis, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki, Wrocław, 2008.
- [24] O. J. Woodman. An introduction to inertial navigation. Technical report, University of Cambridge Computer Laboratory, 2007.