



**AGH**

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,  
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA AUTOMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

Praca dyplomowa magisterska

*Projekt i wykonanie prototypu elektronicznego układu zmiany przełożeń  
w rowerze*

*Design and implementation of a prototype of an electronic gear-shifting  
unit in a bicycle*

Autor:

*Karol Kaim*

Kierunek studiów:

*Automatyka i Robotyka*

Opiekun pracy:

*dr inż. Maciej Rosół*

Kraków, 2016

*Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystycznego wykonania albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.): „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej «sądem koleżeńskim».”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.*

*Serdecznie dziękuję ... tu ciąg dalszych podziękowań np. dla promotora, żony, sąsiada itp.*



## Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	7
1.1. Wprowadzenie	7
1.2. Cel pracy	8
1.2.1. Jakiś tytuł	8
1.2.2. Jakiś tytuł 2	8
<b>2. Zestawienie zagadnień wykorzystanych w pracy</b>	9
2.1. Mechaniczne układy napędowe	9
2.1.1. Przekładnie mechaniczne	9
2.1.2. Układ napędowy w rowerze	10
2.2. Metody pomiarowe wielkości fizycznych	10
2.2.1. Pomiar prędkości kątowej oraz prędkości liniowej	10
2.2.2. Pomiar przyspieszeń	13
2.2.3. Pomiar kąta nachylenia	13
2.3. Sterowanie	14
2.3.1. Zamknięty układ regulacji	14
2.3.2. Serwomechanizm	14
2.4. Kondycjonowanie sygnałów	14
2.4.1. Drganie styków	14
2.4.2. Filtr donlnoprzepustowy	14
<b>3. Opis podzespołów oraz narzędzi programistycznych wykorzystanych w trakcie realizacji projektu</b>	15
3.1. Wykaz podzespołów	15
3.1.1. Przerzutka tylna	15
3.1.2. Serwomechanizm	15
3.1.3. Mikrokontroler	15
3.1.4. Czujniki pomiarowe	15
3.1.5. Układ zasilania	15

3.2.	Narzędzia programistyczne .....	15
3.2.1.	Code Composer Studio 6.0.0 .....	15
3.2.2.	Biblioteka TivaWare.....	15
3.2.3.	Pozostałe oprogramowanie .....	15

# 1. Wstęp

## 1.1. Wprowadzenie

Nowoczesne technologie znajdują coraz większe zastosowanie w codziennym życiu. Szybki rozwój techniki, miniaturyzacja oraz niższe koszty produkcji sprawiają, że coraz więcej urządzeń codziennego użytku wyposażonych jest w układy elektroniczne, które skutecznie zwiększają ich możliwości.

Obserwując rynek rowerowy można zauważyć, iż coraz większy nacisk kładziony jest na rozwój oraz zastosowanie wszelkiego rodzaju podzespołów rowerowych, wykorzystujących układy elektroniczne. Doskonałym przykładem takiego urządzenia, a właściwie zespołu urządzeń stanowiących integralną całość produktu, są elektroniczne układy do zmiany przełożeń w rowerze.

Pierwsze próby opracowania takich układów miały miejsce w latach 90 ubiegłego wieku. Jednak ze względu na wygórowaną cenę, wyższą zawodność niż odpowiedniki mechaniczne oraz wysoką masę, która zwłaszcza w kolarstwie szosowym jest nie do zaakceptowania, nie odniosły komercyjnego sukcesu. Dopiero w roku 2009 japońska firma Shimano wprowadziła na rynek w pełni funkcjonalny układ DuraAce Di2( z ang. *Digital Integrated Intelligence*)([**Dil00** ]). Grupa potwierdziła swoją wysoką pozycję na rynku m.in. poprzez to, że rowery wyposażone w ten napęd wygrały już kilkakrotnie wielkie wyścigi kolarskie, np. TourDeFrance. W 2015 Shimano wprowadziło na rynek grupę XTR Di2. Jest to odpowiednik DuraAce Di2 do zastawiań w kolarstwie górskim. Shimano potwierdziło tym samym swoją dominację na rynku. Największy konkurent, firma SRAM, wprowadziła do swojej oferty układ sterowany elektronicznie dopiero w roku 2016. Seria RED eTAP, oferowana przez SRAM, wyróżnia się kilkoma ciekawymi rozwiązaniami. Jest to system w pełni bezprzewodowy, który do transmisji danych używa nielicencjonowanego pasma 2.4 GHz a dane szyfrowane są przy użyciu kluczy o długości 128 bitów. System w pełni bezprzewodowy wymusił zastosowanie rozproszonego systemu zasilania, na który składają się dwa akumulatory litowo-jonowe zasilające przerzutki oraz dwie baterie CR2032 zasilające klamkomanetki[**bikeWorld.pl** ].

Ze względu na wiele zalet, elektroniczne układy zmiany przełożeń w rowerze zyskują coraz większe grono użytkowników. Przede wszystkim eliminują wady odpowiedników mechanicznych - nie są podatne na zużycie przewodów, dzięki czemu zachowują precyzję działania a czynności serwisowe sprowadzają się jedynie do ładowania akumulatorów. Umożliwiają zmianę przełożeń praktycznie bez żadnego wysiłku ze strony rowerzysty. Do tego zastosowanie przycisków w różnych miejscach na kierownicy sprawia, że użytkownik nie musi zmieniać pozycji rąk aby zmienić przełożenie. W przypadku

klasycznych klamkomanetek takie rozwiązanie nie jest możliwe. Jedyną wadą układów elektronicznych jest ich cena. W momencie opracowywania niniejszej pracy cena za kompletny układ napędowy z gupy Shimano DuraAce Di2 wynosiła około 1500\$

## 1.2. Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest wykonanie prototypu elektronicznego układu zmiany przełożeń w rowerze. Nawiązując do produktów oferowanych na rynku, autor zakłada, iż uda się wykonać system, który nie tylko będzie oferował ręczny dobór przełożeń, ale zostanie rozszerzony o możliwość automatycznej zmiany przełożeń wraz z możliwością profilowania charakterystyki pracy układu. Głównymi elementami mechanicznymi prototypu będą przerzutka tylna 8-rzędowa SRAM X-7, kaseta 8-rzędowa oraz blat przedni. Wózek przerzutki będzie pozycjonowany z wykorzystaniem serwomechanizmu. Układ sterowany będzie przy uruchomieniu mikrokontrolera. Do tego zostaną wykorzystane odpowiednie urządzenia pomiarowe, niezbędne do wykonania trybu automatycznego. Autor zdaje sobie sprawę, iż wykoanie prototypu, który pod względem mechanicznym może stanowić konkurencję dla rozwiązań oferowanych na rynku, wymagałoby niezwykle dużego nakładu pracy. Dlatego swoją uwagę skupił głównie na opracowaniu kompleksowego algorytmu sterującego, który nie jest oferowany przez żadnego z producentów.

@TODO Opisać w skrócie kolejne rozdziały pracy

### 1.2.1. Jakiś tytuł

#### 1.2.1.1. Jakiś tytuł w subsection

#### 1.2.2. Jakiś tytuł 2



## 2. Zestawienie zagadnień wykorzystanych w pracy

### 2.1. Mechaniczne układy napędowe

#### 2.1.1. Przekładnie mechaniczne

Układ napędowy to zestaw urządzeń wykorzystywany do napędzania, w skład którego wchodzi źródło energii, układy pośredniczące w przekazywaniu energii oraz odbiornik energii. Mianem napędu zazwyczaj określa się urządzenia pośredniczące. Najczęściej wykorzystywanymi źródłami energii są silniki a odbiorniki energii, których zadaniem jest realizowanie odpowiednich ruchów roboczych, przyjmując różne formy zależne od aplikacji.

Układ mechaniczny wykorzystany do przeniesienia ruchu obrotowego z elementu czynnego na element bierny nazywany jest przekładnią mechaniczną. Oprócz transmisji energii, przekładnie umożliwiają również zmianę parametrów ruchu - momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej. Przekładnie mechaniczne dzieli się na trzy grupy: cięgnowe, cierne i zębate. Przekładnie cięgnowe, które zostały opisane ze względu na zastosowanie w rowerowych układach napędowych, składają się z co najmniej dwóch kół zębatach, rozsuniętych względem siebie, oraz cięgna opasującego. Ze względu na rodzaj zastosowanego cięgna, wyróżnia się przekładnie pasowe oraz łańcuchowe. Przenoszenie siły z cięgna na koło zębate jest możliwe dzięki zastosowaniu odpowiednich połączeń - połączenia cierne, kształtowe lub stałe przymocowanie cięgna do koła zębatego.

@TODO wrzucić schemat przekładni, dodać jakiś przypis doprzekładni

Wielkością charakteryzującą przekładnie jest przełożenie. Wyróżnia się przełożenie geometryczne, kinematyczne oraz dynamiczne. Przełożenie kinematyczne to stosunek prędkości kątowej koła czynnego do prędkości kątowej koła biernego: @TODO wzorek  $i = \omega_1 / \omega_2$

Przełożenie dynamiczne określa stosunek momentu obrotowego na kole biernym do momentu obrotowego koła czynnego.

@TODO wzorek  $i = M_2 / M_1$

Przełożenie przekładni jest parametrem bezwymiarowym. Ze względu na wartość przełożenia przekładni wyróżnia się:

- Przekładnie przyspieszające lub tzw. multiplikatory. Przekładnie tego typu zwiększają prędkość kątową koła biernego względem prędkości kątowej koła czynnego przy jednoczesnym zmniejszeniu momentu obrotowego koła biernego względem momentu obrotowego koła czynnego. Przełożenie takiej przekładni jest liczbą z zakresu od 0 do 1.
- Przekładnie redukujące lub tzw. reduktory. Przekładnie tego typu działają w sposób odwrotny do przekładni przyspieszających - zmniejszają prędkość kątową koła biernego względem prędkości kątowej koła czynnego oraz zwiększają moment obrotowy koła biernego względem momentu obrotowego koła czynnego. Przełożenie przekładni redukującej jest zawsze większe od 1.

### 2.1.2. Układ napędowy w rowerze

W przypadku konwencjonalnego układu napędowego stosowanego w rowerach źródłem energii jest rowerzysta. Siła przyłożona do ramienia korby generuje moment obrotowy, który przenoszony jest, przy pomocy mechanizmu korbowego i łańcucha, na koło zębate na stałe przymocowane do piasty tylnego koła. Moment obrotowy koła napędzającego powoduje powstanie sił obwodowych, składających się na siłę napędową, która wprawia rower w ruch postępowy.

Układ napędowy roweru wykorzystanego w pracy składa się z mechanizmu korbowego z jednym kołem zębatym, łańcucha, kasety ośmiorzędowej oraz przerzutki tylnej. Koło zębate zamontowane w mechanizmie korbowym ma 34 zęby. Kasetę składa się z ośmiu kół zębatych, których liczba zębów należy do zakresu od 11 do 32. Przekładnia zastosowana w rowerze, niezależnie od aktualnego biegu, ma zawsze charakter multiplikatora.

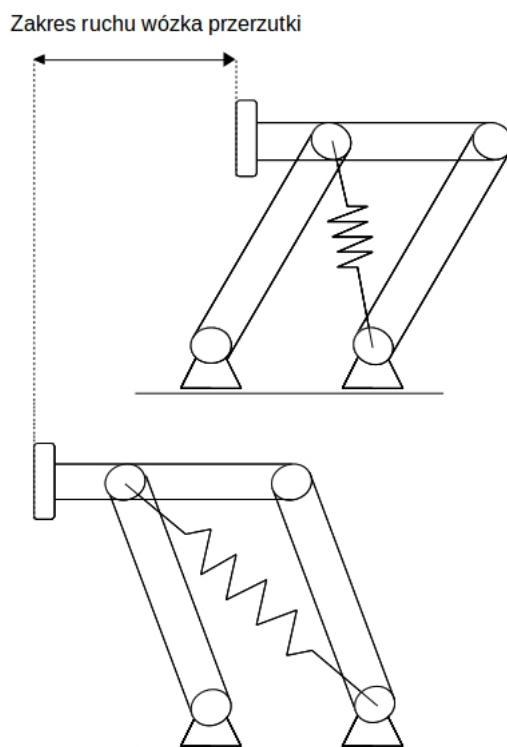
Tylna przerzutka umożliwia zmianę przełożenia układu napędowego. Działa na zasadzie czworoboku przegubowego. Składa się z czterech członów połączonych przegubowo, tworzących zamknięty łańcuch kinematyczny. Pozycja wózka przerzutki przymontowanego do jednego z członów (Rys.2.1) utrzymywana jest dzięki zastosowaniu sprężyny napinającej oraz cięgna, połączonego z mechanizmem do zmiany przełożeń, zamontowanym w manetce. Dodatkowo przerzutka posiada mechanizm napinający łańcuch, tak aby zachować pełną funkcjonalność układu napędowego niezależnie od aktualnej pozycji wózka.

## 2.2. Metody pomiarowe wielkości fizycznych

### 2.2.1. Pomiar prędkości kątowej oraz prędkości liniowej

Możliwość pomiaru prędkości kątowej jest kluczowa ze względu na wykonanie trybu automatycznej zmiany przełożeń. Na podstawie aktualnej prędkości kątowej tylnego koła wyznaczona zostanie chwilowa prędkość liniowa. Pomiar prędkości kątowej mechanizmu korbowego umożliwi wyznaczenie aktualnej wartości kadencji.

Prędkość kątowa jest wielkością wektorową, jednak w rozważaniach dotyczących pracy brana pod uwagę jest jedynie chwilowa wartość prędkości kątowej. Ta zdefiniowana jest jako zmiana drogi kątowej



**Rys. 2.1.** Zasada działania konwencjonalnej przerytutki rowerowej

w czasie:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.1)$$

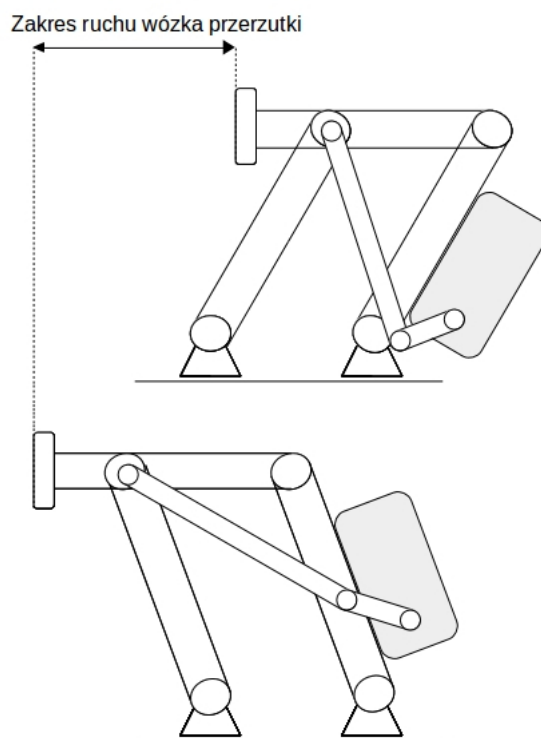
$\varphi$  – droga kątowa

$t$  – czas

Wyznaczenie chwilowej wartości prędkości kątowej wykonane zostało w oparciu o czujniki zbliżeniowy załączany magnetycznie, który został na stałe przymocowany do ramy roweru, w niewielkiej odległości od tylnego koła. Zasada działania takiego czujnika jest analogiczna do działania zwykłego przycisku monostabilnego. Obwód w czujniku jest domyślnie rozarty. Zwarcie następuje w momencie zbliżenia magnesu do czujnika. Magnes przyczepiony został do szprychy roweru. Taki sam sposób pomiaru prędkości można znaleźć w komercyjnych licznikach rowerowych oferowanych na rynku. Autor zdecydował się na zastosowanie dwóch magnesów w celu zwiększenia dokładności pomiaru. Dysponując pomiarem czasu pomiędzy kolejnymi zvarciami czujnika magnetycznego, które, ze względu na zastosowanie dwóch magnesów, następują w wyniku obrotu koła o kąt  $\pi$ , można wyznaczyć chwilową wartość prędkości kątowej:

$$\omega = \frac{\pi}{T} \quad (2.2)$$

$T$  – czas od ostatniego zvarcia czujnika magnetycznego



**Rys. 2.2.** Zasada działania przerzutki rowerowej z wykorzystaniem serwomechanizmu

Prędkość kątowa mechanizmu korbowego została wyznaczona w sposób analogiczny. Zbliżeniowy czujnik magnetyczny, który został na stałe przymocowany do ramy roweru, w bliskiej odległości mechanizmu korbowego, jest zwierany w każdym cyklu dzięki zastosowaniu magnesu, który został przyklejony do ramienia mechanizmu korbowego. Ze względu na zastosowanie jednego magnesu, przyrost drogi kątowej jest dwa razy większy, niż w przypadku pomiaru prędkości kątowej koła roweru i jego wartość wynosi  $2\pi$ .

Wartość prędkości liniowej to stosunek przebytej drogi do czasu:

$$v = \frac{s}{t} \quad (2.3)$$

$s$  – droga liniowa

$v$  – prędkość liniowa

Związek pomiędzy drogą liniową a drogą kątową wyraża się wzorem:

$$\varphi = \frac{s}{r} \quad (2.4)$$

$r$  – promień okręgu

W układzie pomiarowym z dwoma magnesami, wartość drogi kątowej w momencie zwarcia czujnika magnetycznego wynosi  $\pi$ . Biorąc pod uwagę powyższe zależności, chwilowa wartość prędkości liniowej

poruszającego się roweru może zostać wyznaczona z zależności:

$$v = \frac{\pi R}{T} \quad (2.5)$$

$R$  – promień koła rowerowego

### 2.2.2. Pomiar przyspieszeń

Z drugiej zasady dynamiki Newtona wynika, iż przyspieszenie jest proporcjonalne do wypadkowej siły działającej na ciało. Znajomość chwilowej wartości oraz zwrotu przyspieszenia jest drugą istotną informacją, która została wykorzystana przy projektowaniu sterownika trybu automatycznego, gdyż może dostarczyć wiedzy na temat dynamiki ruchu.

Pomiar przyspieszenia został zrealizowany w oparciu o zastosowanie akcelerometru wykonanego w technologii MEMS( z ang. *Micro Electro-Mechanical Systems*). Układy MEMS to urządzenia wykonane w miniaturowej skali, które integrują ze sobą elementy mechaniczne oraz elektroniczne. Wykorzystywane głównie jako czujniki przetwarzające wielkości mechaniczne na wielkości elektryczne. Czujniki wykonane w technologii MEMS posiadają kilka znaczących zalet, które sprawiają, że spektrum zastosowań staje się coraz szersze. Są to m.in. niska cena, niewielkie rozmiary, niskie zużycie energii oraz prosta integracja z układami mikroprocesorowymi. Akcelerometry wykonane w tej technologii są powszechnie wykorzystywane w różnego rodzaju aplikacjach. Układy sterujące poduszkami powietrznymi, systemy alarmowe w samochodach czy tzw. asysten ruszania na wzniesieniu to tylko niektóre przykłady z branży motoryzacyjnej.

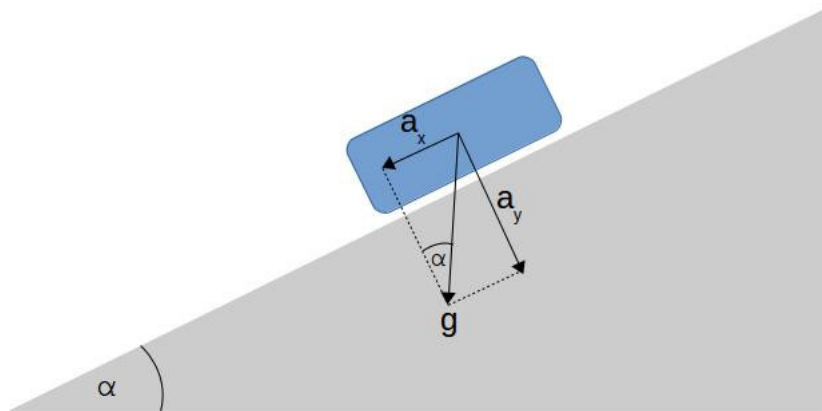
Akcelereometr to urządzenie pomiarowe, które umożliwia pomiar przyspieszenia dynamicznego ciała, na które działa niezerowa siła wypadkowa, oraz przyspieszenia statycznego ciała znajdującego się w ziemskim polu grawitacyjnym. Akcelerometry zazwyczaj działają na zasadzie przetworników pojemnościowych. Pomiar dokonywany jest dzięki zastosowaniu kondensatorów różnicowych, których ruchome okładki wychylane są z położenia równowagi pod wpływem działających sił bezwładności.

Akcelometr wykonany w technologii MEMS zazwyczaj umożliwia pomiar przyspieszenia w trzech różnych kierunkach(@TODO rysunek). Akcelometr został zamontowany w rowerze w taki sposób, aby kierunek osi  $X$  był równoległy do podłoża. Dzięki temu wskazania akcelerometru wzdłuż osi  $X$  są proporcjonalne do siły wypadkowej działającej na rower.

### 2.2.3. Pomiar kąta nachylenia

Kąt nachylenia podłoża, po którym porusza się rower, to ostatnia z wielkości brana pod uwagę przez algorytm automatycznej zmiany przełożeń. Wielkość ta wyznaczona zostanie pośrednio, poprzez analizę danych odczytywanych z akcelerometru.

Przykład zamieszczony na rysunku 2.3 przedstawia ciało znajdujące się na równi pochyłej. Przyspieszenie ziemskie  $g$  zostało rozłożone na kierunki składowe wzdłuż osi pomiarowych akcelerometru -  $a_x$  oraz  $a_y$ . Wektory składowe wraz z przyspieszeniem ziemskim stanowią trójkąt podobny do trójkąta równi pochyłej, której kąt nachylenia został oznaczony jako  $\alpha$ . Stosunek długości przyprostokątnej



Rys. 2.3. a nice plot

leżącej naprzeciw kąta  $\alpha$  do wartości drugiej przyprostokątnej, które odpowiadają wartością przyspieszeń mierzonym przez akcelerometr odpowiednio wzdłuż osi  $x$  i  $y$ , wynosi  $\tan \alpha$ . Zastosowanie funkcji odwrotnej pozwala wyznaczyć kąt nachylenia równi:

$$\alpha = \arctan \frac{a_x}{a_y} \quad (2.6)$$

$\alpha$  – kąt nachylenia podłoża

$a_x$  – przyspieszenie akcelerometru mierzone wzdłuż osi  $x$

$a_y$  – przyspieszenie akcelerometru mierzone wzdłuż osi  $y$

## 2.3. Sterowanie

### 2.3.1. Zamknięty układ regulacji

### 2.3.2. Serwomechanizm

## 2.4. Kondycjonowanie sygnałów

### 2.4.1. Drganie styków

### 2.4.2. Filtr dolnoprzepustowy

### **3. Opis podzespołów oraz narzędzi programistycznych wykorzystanych w trakcie realizacji projektu**

#### **3.1. Wykaz podzespołów**

##### **3.1.1. Przerzutka tylna**

##### **3.1.2. Serwomechanizm**

##### **3.1.3. Mikrokontroler**

##### **3.1.4. Czujniki pomiarowe**

##### **3.1.4.1. Akcelerometr**

##### **3.1.4.2. Zbliżeniowe czujniki magnetyczne**

##### **3.1.5. Układ zasilania**

#### **3.2. Narzędzia programistyczne**

##### **3.2.1. Code Composer Studio 6.0.0**

##### **3.2.2. Biblioteka TivaWare**

##### **3.2.3. Pozostałe oprogramowanie**