



A G H

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 rozpozna 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, videogram 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 osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania dla promotora pracy, dr Macieja Rosoła, za okazane wsparcie i pomoc w trakcie pisania niniejszej pracy dyplomowej.

Spis treści

1. Wstęp.....	7
1.1. Wprowadzenie	7
1.2. Cel i zakres pracy	8
2. Rowerowe układy napędowe	11
2.1. Przekładnie mechaniczne	11
2.2. Układ napędowy w rowerze	12
2.3. Układy napędowe oferowane na rynku komercyjnym	13
3. Zestawienie zagadnień wykorzystanych w trakcie realizacji projektu.....	17
3.1. Serwomechanizm - budowa i zasada działania.....	17
3.2. Pasatywny filtr dolnoprzepustowy RC	18
3.3. Metody pomiarowe wielkości fizycznych	19
3.3.1. Pomiar prędkości kątowych koła i mechanizmu korbowego.....	19
3.3.2. Prędkość liniowa roweru	20
3.3.3. Inercyjna jednostka pomiarowa IMU.....	21
3.4. Estymata kąta nachylenia podłoża.....	22
3.4.1. Analiza danych pomiarowych akcelerometru	22
3.4.2. Analiza danych pomiarowych żyroskopu	23
3.4.3. Filtr komplementarny	23
4. Zasada działania sterownika układu.....	27
4.1. Struktura programu.....	27
4.2. Opis stanów programu.....	28
4.2.1. Inicjalizacja układów peryferyjnych mikrokontrolera	28
4.2.2. Tryb ręczny	29
4.2.3. Tryb comfort	29
4.2.4. Tryb active.....	29
4.2.5. Tryb sport	30
4.2.6. Błąd komunikacji I2C	31

4.2.7. Niski poziom oraz rozładowanie pakietu	31
4.2.8. Wskaźnik aktualnego trybu.....	31
5. Realizacja projektu.....	33
5.1. Narzędzia programistyczne	33
5.1.1. Code Composer Studio 6.0.0	33
5.1.2. Biblioteka TivaWare Peripheral Driver	33
5.1.3. Pozostałe oprogramowanie	34
5.2. Wykaz podzespołów	34
5.2.1. Przerzutka tylna.....	34
5.2.2. Serwomechanizm.....	34
5.2.3. Mikrokontroler	35
5.2.4. Czujniki pomiarowe	35
5.2.5. Układ zasilania.....	36
5.3. Modyfikacja przerzutki.....	36
5.4. Integracja elementów elektronicznych	38
5.5. Implementacja głównych funkcjonalności	39
5.5.1. Kontrola serwomechanizmu.....	39
5.5.2. Obsługa przycisków	40
5.5.3. Obsługa zbliżeniowych czujników magnetycznych	42
5.5.4. Obsługa jednostki pomiarowej Pololu AltIMU10	42
5.5.5. Pomiar poziomu naładowania pakietu zasilającego.....	43
6. Eksperymenty.....	45
6.1. Środowisko testowe	45
6.2. Wyniki tesów	46
6.2.1. Tryb ręczny	46
6.2.2. Tryb comfort	47
6.2.3. Tryb active.....	48
6.2.4. Tryb sport	49
7. Podsumowanie oraz plany rozwoju projektu	53
8. Dodatek A	55
9. Dodatek B	57
10. Bibliografia	59

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 zwiększą ich możliwości.

Obserwując rynek rowerowy można zauważyc, 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. Ta grupa produktów rozwijana jest, przez znaczących producentów sprzętu rowerowego, w najszybszym tempie. Warto jednak zwrócić uwagę, że nie jest jedyna. W momencie realizacji projektu, producenci testują na przykład układy adaptacyjnego zawieszenia rowerowego.

Pierwsze próby opracowania elektronicznych układów do zmiany przełożeń w rowerze miały miejsce w latach 90 ubiegłego wieku. Jednak ze względu na wysoką 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(*ang. Digital Integrated Intelligence*) [1]. Grupa potwierdziła swoją wysoką pozycję na rynku m.in. poprzez to, że rowery wyposażone w ten napęd wygrały już kilkukrotnie wielkie wyścigi kolarskie, np. TourDeFrance. W 2015 Shimano wprowadziło na rynek grupę XTR Di2. Jest to odpowiednik DuraAce Di2 do zastosowań w kolarstwie górkim. 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 klamkomanteki [2].

Ze względu na wiele zalet, elektroniczne układy zmiany przełożeń w rowerze zyskują coraz większe grono użytkowników, nie tylko tych w zawodowym peletonie czy zawodowych maratonach górskich.

Przede wszystkim eliminują wady odpowiedników mechanicznych - nie są podatne na zużycie przewodów, dzięki czemu zachowują precyzyję 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, montowanych w rowerach szosowych, takie rozwiązanie nie jest możliwe. Jedyną wadą układów elektronicznych jest ich cena. W momencie opracowywania niniejszej pracy cena za kompletny układ napędowy z grupy Shimano DuraAce Di2 wynosiła około 1500\$

1.2. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest zaprojektowanie i 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-5, kaseta 8-rzędowa oraz blat przedni. Wózek przerzutki będzie pozycjonowany z wykorzystaniem serwomechanizmu. Sterownik układu zbudowany zostanie w oparciu o mikrokontroler. Wykorzystane zostaną również odpowiednie urządzenia pomiarowe, niezbędne do wykonania trybu automatycznego. Autor zdaje sobie sprawę, iż wykonanie 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.

Rozdział drugi zawiera informacje na temat rowerowych układów napędowych. Pokrótko scharakteryzowano mechaniczne układy napędowe oraz przedstawiono zasadę działania przeniesienia napędu w rowerze. Zaprezentowane zostały również komercyjne produkty, które zdaniem Autora, wyróżniają się innowacyjnością i są warte odnotowania.

W rozdziale trzecim przedstawiono zagadnienia teoretyczne wykorzystane w trakcie budowy prototypu układu. Omówiono zasadę działania serwomechanizmu i filtra dolnoprzepustowego. Następnie zaprezentowano metody pomiarowe wielkości fizycznych, takich jak kadencja, prędkość roweru czy kąt nachylenia podłoża, po którym porusza się rower. Ostatnia z wielkości wyznaczana jest w oparciu o zastosowanie filtra komplementarnego.

Kolejny rozdział zawiera opis zasady działania sterownika układu. Wysokopoziomowa struktura programu, porównana do skończonej maszyny stanów, zawiera w sobie wszystkie funkcjonalności oraz wymagania dotyczące każdego z trybów pracy sterownika.

Następnie zaprezentowany został proces realizacji projektu. Pierwsza część rozdziału zawiera opis wykorzystanych narzędzi programistycznych. Dalej przedstawiono parametry techniczne głównych podzespołów. Są to zestaw uruchomieniowy z mikrokontrolerem Texas Instruments, przerzutka, czujniki

pomiarowe oraz układ zasilania. W kolejnej części tego rozdziału można znaleźć informacje na temat sposobu montażu serwomechanizmu do przerzutki, zasady działania przerzutki sterowanej przy pomocy serwomechanizmu oraz integracji elementów elektronicznych. Przedstawiono również szczegóły implementacji głównych funkcjonalności.

Rozdział szósty zawiera wyniki testów, jakim poddany został sterownik układu. Zaprezentowane scenariusze testowe zostały tak przygotowane, aby sprawdzić działanie wszystkich trybów pracy sterownika zgodnie z wymaganiami przedstawionymi w rozdziale czwartym.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie projektu wraz z wnioskami Autora. Nakreślone również zostały plany rozwoju projektu.

2. Rowerowe układy napędowe

Niniejszy rozdział zawiera informacje na temat układów napędowych stosowanych w rowerach. Przedstawiono pojęcia związane z przekładniami mechanicznymi, zasadę działania konwencjonalnego układu napędowego, przeznaczonego do zastosowań w kolarstwie, oraz najciekawsze rozwiązania oferowane na rynku komercyjnym.

2.1. Przekładnie mechaniczne

Układ napędowy to zestaw urządzeń wykorzystywany do przekazywania energii mechanicznej, w skład którego wchodzi źródło energii, układy pośredniczące w przekazywaniu energii oraz odbiornik energii [3]. Mianem napędu zazwyczaj określa się urządzenia pośredniczące. Najczęściej wykorzystywanymi źródłami energii są silniki, a odbiorniki energii, których zadaniem jest realizowanie odpowiednich ruchów roboczych, przyjmują różne formy zależne od aplikacji.

Układ mechaniczny wykorzystany do przeniesienia ruchu obrotowego z elementu czynnego na element bierny nazywany jest przekładnią mechaniczną. Element czynny to element napędzający, natomiast element bierny to element napędzany. 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, z powodu zastosowania w rowerowych układach napędowych, składają się z co najmniej dwóch kół, rozsuniętych względem siebie, oraz cięgna opasującego. Ze względu na rodzaj zastosowanego cięgna, wyróżnia się przekładnie pasowe oraz łańcuchowe. Przenoszenie mocy oraz momentu obrotowego jest możliwe dzięki występującym siłą tarcia pomiędzy kołem a cięgnem (połączenia cierne), lub poprzez zazębianie się koła z cięgnem (połączenia kształtowe).

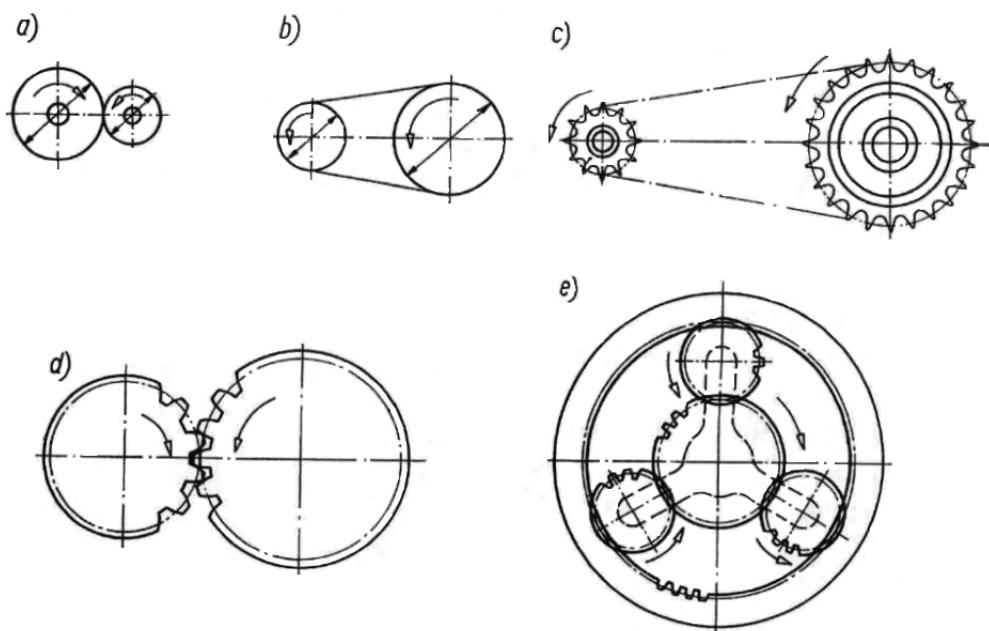
Wielkością charakteryzującą przekładnię jest przełożenie. Wyróżnia się przełożenie geometryczne, kinematyczne oraz dynamiczne. Przełożenie kinematyczne to stosunek prędkości kątowej koła czynnego do prędkości kątowej koła biernego [4]:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2.1)$$

gdzie:

ω_1 – prędkość kątowa koła czynnego,

ω_2 – prędkość kątowa koła biernego.



Rys. 2.1. Różne rodzaje przekładni mechanicznych: a) przekładnia cierna, b) przekładnia cięgnowa pasowa, c) przekładnia cięgnowa łańcuchowa, d - e) przekładnie zębate. Grafika opracowana na podstawie [3].

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

- Przekładnie przyspieszające lub tzw. multiplikatory. Przekładnie tego typu zwiększały 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 zwiększały moment obrotowy koła biernego względem momentu obrotowego koła czynnego. Przełożenie przekładni redukującej jest zawsze większe od 1.

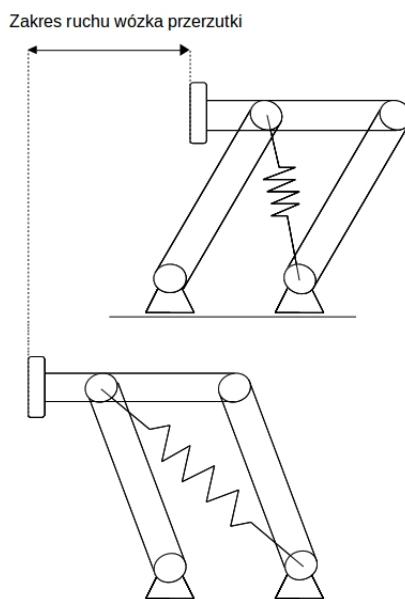
2.2. Układ napędowy w rowerze

W przypadku konwencjonalnego układu napędowego stosowanego w rowerach elementem napędzanym jest rowerzysta. Siła przyłożona do ramienia korby generuje moment obrotowy, który przenoszony jest, przy pomocy mechanizmu korbowego i łańcucha, na koło zębate przymocowane na stałe 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 przerutki tylnej. Liczba zębów koła zębatego zamontowanego w mechanizmie korbowym wynosi 34. Kaseta 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 mnożnika.

Przerutka tylna umożliwia zmianę przełożenia układu napędowego. Działa na zasadzie czworoboku przegubowego. Składa się z czterech członów połączonych przegubowo, tworzących zamknięty łańcuch kinematyczny. Pozycja wózka przerutki, przymocowanego do jednego z członów (rys.2.2), utrzymywana jest dzięki zastosowaniu sprężyny napinającej oraz cięgna, połączonego z mechanizmem do zmiany przełożień, zamontowanym w manetce. Dodatkowo przerutka posiada mechanizm napinający łańcuch, tak aby zachować jego odpowiedni zwis, gwarantujący pełną funkcjonalność układu napędowego, niezależnie od aktualnej pozycji wózka przerutki.



Rys. 2.2. Schemat ilustrujący zasadę działania konwencjonalnej tylnej przerutki rowerowej.

2.3. Układy napędowe oferowane na rynku komercyjnym

Rosnące zainteresowanie branżą rowerową skutkuje wprowadzaniem na rynek coraz bardziej zaawansowanych technologicznie produktów. Dotyczy to właściwie każdego rodzaju części składających się na wyposażenie roweru. W momencie realizacji niniejszego projektu oferowanych na rynku jest co najmniej kilkanaście różnych rodzajów układów napędowych. Różnią się m.in. przeznaczeniem, ilością oferowanych przełożień, zastosowanymi materiałami czy sposobem zmiany przełożień.

Najbardziej ogólną klasyfikację rowerowych układów napędowych stanowi rodzaj kolarstwa, do którego dany produkt jest przeznaczony. Można wyróżnić trzy główne grupy - kolarstwo szosowe, górskie oraz produkty przeznaczone do rowerów miejskich.

Kolarstwo szosowe stanowi główną siłę napędową rozwoju rowerowych układów napędowych. Co raz większe wymagania, pochodzące głównie z zawodowego peletonu, sprawiają, że producenci wprowadzają na rynek coraz bardziej zaawansowane rozwiązania. Produkty te powinny charakteryzować się jak najniższą masą, niezawodnością i precyzją działania. Układy napędowe przeznaczone do rowerów szosowych składają się dwóch przerzutek, kasety, mechanizmu korbowego oraz manetek, zazwyczaj zintegrowanych z klamkami hamulcowymi. Mechanizm korbowy wyposażony jest zazwyczaj w dwa blaty, natomiast kasetę zbudowana jest z kół zębatych, których liczba, zależna od grupy produktu, może wynosić od 8, dla napędów podstawowych, do 11 w przypadku produktów przeznaczonych dla profesjonalnych kolarzy. Podobnie, jak w branży motoryzacyjnej, nowe rozwiązania opracowywane są dla modeli z najwyższej grupy, które z czasem adaptowane są do tańszych odpowiedników. Dlatego Autor skupi się na przedstawieniu najciekawszych rozwiązań, stosowanych w najwyższych grupach napędów, oferowanych przez czołowych producentów. Są to Shimano, SRAM, Campagnolo, oraz FSA. Niska masa



Rys. 2.3. Elektroniczne przerzutki z najwyższej grupy Shimano - DuraAce 9150 [5].

układów napędowych, która w przypadku grup mechanicznych nie przekracza 2000g [6], jest możliwa do osiągnięcia poprzez zastosowanie bardzo lekkich materiałów. Klamkomanetki, ramiona mechanizmu korbowego, wózek tylnej przerzutki wykonane są z włókna węglowego. Stosowane są również kompozyty zbrojone włóknem węglowym CFRP(*ang. Carbon Fiber Reinforced Plastics*), stopy aluminium i tytanu [5]. W momencie realizacji projektu, bardzo dużym zainteresowaniem cieszą się tzw. elektroniczne układy napędowe, w których wózek przerzutki pozycjonowany jest przy użyciu serwomechanizmu. Każdy wymieniony wyżej producent posiada w swojej ofercie taki produkt. Są to odpowiednio DuraAce Di2, RED eTAP, Super Record EPS i K-Force WE. System oferowany przez Shimano i Campagnolo jest systemem przewodowym z pojedynczym pakietem zasilającym. Produkt firmy SRAM jest

układem w pełni bezprzewodowym, wykorzystującym dedykowany protokół transmisji danych. Rozwiążanie pośrednie, oferowane przez FSA, polega na połączeniu przerzutek przez układ dystrybucji zasilania i jednostkę sterującą pracą serwomechanizmów oraz zastosowaniu bezprzewodowej transmisji danych ANT+ pomiędzy jednostką sterującą a klamkomanejkami [7].

Wymagania stawiane układom napędowym, przeznaczonym do kolarstwa górskiego, różnią się względem odpowiedników szosowych. Konieczna jest większa wytrzymałość oraz odporność na niekorzystne warunki atmosferyczne. Niska masa oraz aerodynamiczny kształt nie są priorytetem, jak ma to miejsce w kolarstwie szosowym. Charakter pokonywanych tras sprawia, że nie są osiągane aż tak wysokie prędkości. Biorąc to wszystko pod uwagę, producenci oferują układu na miarę potrzeb kolarzy. Shimano w swojej ofercie posiada elektroniczne grupy XTR i XT. Największy konkurent, SRAM, opracowuje innowacyjne napędy 1x11 i 1x12, które zaczynają powoli dominować nad klasycznymi układami z przednią przerzutką. Inżynierowie SRAM doszli do wniosku, że takie rozwiązanie ma dużo zalet. Pierwsza z nich to oszczędność masy. Możliwość wyeliminowania przedniej przerzutki, manetki i pancera z linką sprawia, że SRAM XX1 Eagle jest około 20% lżejszy od mechanicznej grupy Shimano XTR i waży zaledwie 465g [8][9]. Kolejną zaletą jest możliwość montażu urządzeń do sterowania pracą zawieszenia lub wysuwaną sztycą, w miejscu manetki przedniej przerzutki. Jednak największą zaletą tej grupy produktów jest możliwość zastosowania rozwiązań zwiększających napięcie łańcucha, dzięki czemu nawet w trudnym terenie łańcuch nie spada z mechanizmu korbowego. Te rozwiązania to spe-



Rys. 2.4. SRAM XX1 Eagle - rozwiązanie problemu niskiego zakresu przełożeń poprzez zastosowanie kasety, której największe koło zębate posiada 50 zębów [10].

cjalna konstrukcja przedniego blatu, którego kształt oraz naprzemiennie zmieniająca się budowa zębów utrzymuje łańcuch w odpowiedniej pozycji (tzw. blaty typu Narrow-Wide), oraz mocna sprężyna wózka przerzutki, która lepiej stabilizuje pozycję łańcucha. Jedyną wadą tego typu napędów jest mniejsza liczba przełożeń - w stosunku do napędów z dwoma biegami przedniej przerzutki jest ich dokładnie dwa razy mniej. Z tego może wynikać mniejszy zakres przełożeń. Aby zapobiec temu problemowi, SRAM wprowadził w grupie XX1 Eagle kasetę, w której największe koło zębate posiada aż 50 zębów, co skutecznie niweluje problem mniejszego zakresu dostępnych przełożeń.

Napędy montowane w rowerach miejskich powinny charakteryzować się dużą niezagwodnością, niską ceną oraz prostotą obsługi. Dodatkowo ważne jest, aby takie napędy były w miarę możliwości bezobsługowe. Sposób oraz charakter pokonywanych tras sprawia, że użytkownicy nie wymagają dużego zakresu przełożeń. Producenci sprzętu rowerowego nie rozwijają tej grupy napędów tak szybko, jak produktów przeznaczonych do zastosowania w kolarstwie górkim czy szosowym. Jedynym rozwiązaniem, na które według Autora warto zwrócić uwagę, są piasty wielobiegowe. Zmiana przełożenia jest możliwa dzięki zastosowaniu przekładni planetarnej, zamontowanej wewnątrz piasty tego koła. Główne zalety tego rozwiązania to wysoki stopień integracji części mechanicznych ukrytych w piaście, brak konieczności przeprowadzania czynności serwisowych oraz prosta obsługa. Główni producenci rowerowych układów napędowych, a są to Shimano i SRAM, oferują kilka grup napędów tego rodzaju. Shimano posiada w swojej ofercie grupę Alfine oraz Nexus. SRAM oferuje produkty i-MOTION 3, Automatix oraz G8.

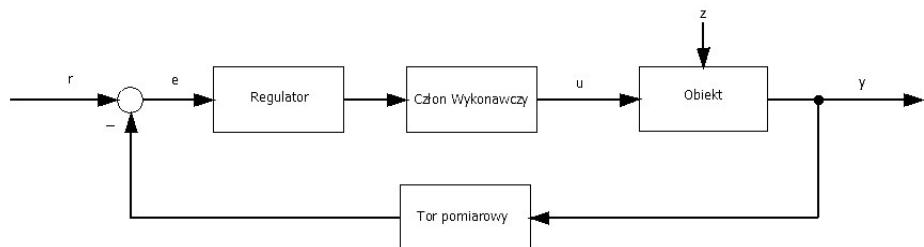
3. Zestawienie zagadnień wykorzystanych w trakcie realizacji projektu

W niniejszym rozdziale przedstawiono zagadnienia wykorzystane do realizacji układu zmiany przełożień. Zamieszczono opis zasady działania serwomechanizmu, filtru dolnoprzepustowego RC oraz metod pomiarowych wielkości fizycznych, niezbędnych do poprawnego działania sterownika układu.

3.1. Serwomechanizm - budowa i zasada działania

Serwomechanizm to układ automatycznej regulacji, który służy do precyzyjnego sterowania silnikiem elektrycznym. Serwomechanizm wykorzystany w pracy pozycjonuje wózek przerzutki w zadanym położeniu.

Układy automatycznej regulacji w serwomechanizmach to zazwyczaj układy zamknięte z ujemną pętlą sprzężenia zwrotnego. Schemat takiego układu regulacji został przedstawiony na rys. 3.1. Zastosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego umożliwia osiągnięcie celu sterowania, pomimo występujących zakłóceń. Mogą to być zakłócenia związane z pomiarami wyjścia, zakłócenia działające na obiekt lub zakłócenia sterowania. Zasada działania układu ze sprzężeniem zwrotnym polega na porównaniu aktualnej wartości wielkości regułowanej y z wartością zadaną r , wyznaczeniu wartości uchybu regulacji e i pobudzenia do pracy regulatora, którego akcja redukuje błąd regulacji, pomimo ciągle działających zakłóceń z [11].



Rys. 3.1. Schemat zamkniętego układu regulacji z ujemną pętlą sprzężenia zwrotnego.

Opis sygnałów : r – wartość zadana, e – uchyb regulacji, u – sterowanie generowane przez regulator , y – wyjście z obiektu, z – zakłócenia działające na obiekt.

Serwomechanizm zbudowany jest z kilku podstawowych elementów, takich jak silnik elektryczny, układ pomiarowy pozycji/prędkości wału silnika, regulator oraz układ mocy. W serwomechanizmach stosowane są silniki prądu stałego lub przemiennego. Serwomechanizmy oferowane na rynku mogą pracować w kilku trybach:

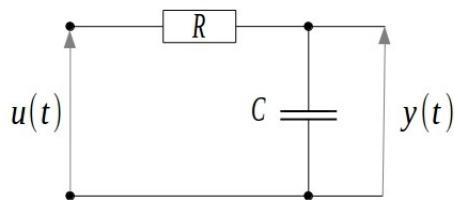
- Tryb regulacji położenia - układ automatycznej regulacji dąży do osiągnięcia zadanej pozycji wału silnika.
- Tryb regulacji prędkości - układ automatycznej regulacji dąży do osiągnięcia zadanej prędkości obrotowej wału silnika.
- Tryb regulacji momentu obrotowego - układ automatycznej regulacji dąży do osiągnięcia zadanego momentu obrotowego generowanego przez silnik.

Szczegóły dotyczące serwomechanizmu, wykorzystanego do realizacji projektu, zostały przedstawione w pkt. 5.2.2

3.2. Pasywny filtr dolnoprzepustowy RC

Filtr to układ, który przenosi na wyjście sygnały o określonej częstotliwości. Filtr dolnoprzepustowy przenosi na wyjście sygnały o niskiej częstotliwości, natomiast blokuje sygnały szybkozmienne. Ze względu na konstrukcję filtru, można je podzielić również na filtry pasywne, zbudowane tylko w oparciu o elementy RLC, i aktywne, wykorzystujące dodatkowo np. wzmacniacze operacyjne.

Najprostszy filtr dolnoprzepustowy to pasywny filtr RC zbudowany z opornika o rezystancji R i kondensatora o pojemności C - rys. 3.2.



Rys. 3.2. Pasywny filtr dolnoprzepustowy RC - $u(t)$ sygnał wejściowy filtru, $y(t)$ sygnał wyjściowy filtru.

Przyjmując napięcie na kondensatorze jako zmienną stanu $x(t)$, sterowanie układu jako sygnał $u(t)$ a obserwację jako sygnał wyjściowy filtru $y(t)$, oraz pamiętając o tym, że prąd płynący przez obwód jest równy zmianie ładunku na kondensatorze, można zapisać model matematyczny układu w postaci równań stanu:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= -\frac{1}{RC}x(t) + u(t) \\ y(t) &= x(t)\end{aligned}\tag{3.1}$$

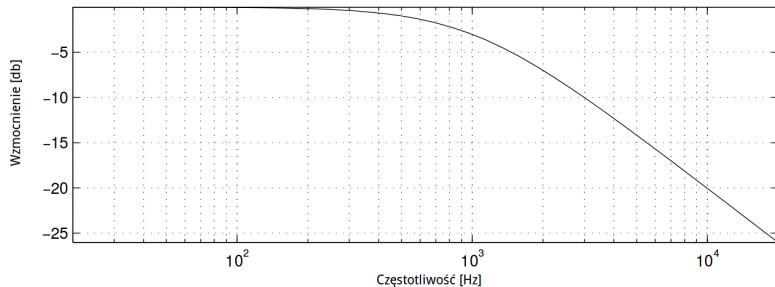
Zgodnie z definicją 4.1 w pkt. *Zagadnienie realizacji transmitancji* w pracy [12], transmitancja operatorowa filtra RC jest opisana zależnością:

$$G(s) = \frac{RCs}{RCs + 1} \quad (3.2)$$

Z powyższego równania wynika, że obwód RC jest układem inercyjnym I rzędu, którego stała czasowa wynosi:

$$T = RC \quad (3.3)$$

Charakterystyka amplitudowa obiektu inercyjnego I rzędu wykazuje zdolność obiektu do tłumienia amplitudy sygnałów o wysokich częstotliwościach, co jest zgodne z zasadą działania filtru dolnoprzepustowego.



Rys. 3.3. Przykładowa charakterystyka amplitudowa układu inercyjnego I rzędu [13].

3.3. Metody pomiarowe wielkości fizycznych

3.3.1. Pomiar prędkości kątowych koła i mechanizmu korbowego.

Możliwość pomiaru prędkości kątowej jest kluczowa ze względu na wykonanie trybu automatycznej zmiany przełożeń. 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 w czasie:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.4)$$

gdzie:

φ – droga kątowa,

t – czas.

Wyznaczenie chwilowej wartości prędkości kątowej jest możliwe dzięki zastosowaniu czujnika zbliżeniowego załączanego magnetycznie, który jest przymocowany do ramy roweru, w niewielkiej odległości do tylnego koła. Zasada działania takiego czujnika jest analogiczna do działania zwykłego przycisku monostabilnego. Obwód w czujniku jest domyślnie rozwarty. Zwarcie następuje w momencie zbliżenia magnesu do czujnika. Magnes przyczepiony jest 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 zwarciami czujnika magnetycznego, które, ze względu na zastosowanie dwóch magnesów, następują w wyniku obrotu koła o kąt π , można wyznaczyć chwilową wartość prędkości kątowej:

$$\omega_{wheel} = \frac{\pi}{T_{wheel}} \quad (3.5)$$

gdzie:

ω_{wheel} – prędkość kątowa tylnego koła [$\frac{rad}{s}$],

T_{wheel} – czas pomiędzy kolejnymi zwarciami czujnika magnetycznego koła [s].

Prędkość kątowa mechanizmu korbowego została wyznaczona w sposób analogiczny. Zbliżeniowy czujnik magnetyczny, na stałe przymocowany do ramy roweru w bliskiej odległości mechanizmu korbowego, jest zwierany w każdym cyklu dzięki zastosowaniu magnesu, który jest 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 2π :

$$\omega_{crank} = \frac{2\pi}{T_{crank}} \quad (3.6)$$

gdzie:

ω_{wheel} – prędkość kątowa mechanizmu korbowego [$\frac{rad}{s}$],

T_{crank} – czas pomiędzy kolejnymi zwarciami czujnika magnetycznego mechanizmu korbowego [s].

3.3.2. Prędkość liniowa roweru

Wartość prędkości liniowej to stosunek przebytej drogi do czasu:

$$v = \frac{s}{t} \quad (3.7)$$

gdzie:

s – droga liniowa,

v – prędkość liniowa.

Związek pomiędzy drogą liniową a drogą kątową, punktu poruszającego się po okręgu o promieniu r , wyraża się wzorem:

$$\varphi = \frac{s}{r} \quad (3.8)$$

W układzie pomiarowym prędkości kątowej koła roweru, który wykorzystuje dwa magnesy, wartość drogi kątowej w momencie zwarcia czujnika magnetycznego wynosi π . Dysponując pomiarem czasu T_{wheel} , chwilowa wartość prędkości liniowej tylnego koła, a zarazem całego roweru, może zostać wyznaczona z zależności:

$$v_{bike} = \frac{\pi R}{T_{wheel}} \quad (3.9)$$

gdzie:

v_{bike} – prędkość roweru [$\frac{m}{s}$],

R – promień koła rowerowego [m].

3.3.3. Inercyjna jednostka pomiarowa IMU

Inercyjna jednostka pomiarowa (ang. *Inertial Measurement Unit*) to układ składający się z kilku czujników pomiarowych, pozwalających wyznaczyć orientację obiektu w przestrzeni trójwymiarowej. Stosowane m.in. w systemach stabilizacji bezzałogowych statków powietrznych. W realizowanym projekcie wykorzystana zostanie możliwość wyznaczenia kąta nachylenia podłożu, po którym porusza się rower z zamontowaną jednostką pomiarową IMU.

Jednostki IMU zazwyczaj wyposażone są w trzyosiowy akcelerometr, trzyosiowy żyroskop oraz magnetometr. Wszystkie czujniki to urządzenia wykonane w miniaturowej skali oraz technologii MEMS (ang. *Micro Electro-Mechanical Systems*), które integrują 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.

3.3.3.1. Pomiar przyspieszeń - akcelerometr

Akcelerometr 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.

Akcelerometry są powszechnie wykorzystywane w różnego rodzaju aplikacjach. Układy sterujące poduszkami powietrznymi, systemy alarmowe w samochodach czy tzw. system ruszania na wznieśieniu to tylko niektóre przykłady z branży motoryzacyjnej [14].

Układy do pomiaru przyspieszenia wykonane w technologii MEMS zazwyczaj składają się z trzech akcelerometrów, które umożliwiają pomiar przyspieszenia w trzech różnych kierunkach. Akcelerometr został zamontowany w rowerze w taki sposób, aby kierunek osi x był równoległy do podłożu (rys. 3.4).

3.3.3.2. Pomiar prędkości kątowych - żyroskop

Żyroskop to urządzenie pomiarowe dostarczające informacji na temat chwilowej prędkości obrotowej układu pomiarowego. Żyroskopy wykonane w technologii MEMS to czujniki pojemnościowe wykorzystujące efekt Coriolisa. Układ dwóch wibrujących mas, umieszczony na obrotowej tarczy, zmienia swoje położenie względem osi obrotu w zależności od chwilowej prędkości obrotowej. W wyniku zmiany położenia układu mas odkształceniu ulega tarcza, która stanowi okładkę kondensatora. W efekcie następuje różnicowa zmiana pojemności kondensatora, która przetwarzana jest na chwilową prędkość obrotową [15].

Żyroskop, podobnie jak akcelerometr, to układ trzech czujników pozwalający na pomiar prędkości kątowej w trzech różnych kierunkach. Zamontowany został w taki sposób, aby kierunek osi żyroskopu x oraz z był równoległy do podłoża.

3.4. Estymata kąta nachylenia podłoża

Kąt nachylenia podłoża, po którym porusza się rower, to ostatnia z wielkości brana pod uwagę przez algorytm automatycznej zmiany przełożeń. Wielkość ta wyznaczana jest pośrednio, poprzez zastosowanie filtra komplementarnego, wykorzystującego dane pomiarowe pochodzące z akcelerometru oraz żyroskopu.

3.4.1. Analiza danych pomiarowych akcelerometru

Przykład zamieszczony na rysunku 3.4 przedstawia ciało znajdujące się na równi pochylnej. 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, będącego przekrojem równi pochylnej, o kącie nachylenia oznaczonym jako α . Stosunek długości przypustokątnej leżącej naprzeciw kąta α do wartości drugiej przypustokątnej, które odpowiadają wartością przyspieszeń mierzonych przez akcelerometr odpowiednio wzdłuż osi x i y , wynosi $\tan \alpha$. Zastosowanie funkcji odwrotnej pozwala wyznaczyć kąt nachylenia równi:

$$\alpha = \arctan \frac{a_x}{a_y} \quad (3.10)$$

gdzie:

α – kąt nachylenia podłoża

a_x – przyspieszenie akcelerometru mierzone wzdłuż osi X ,

a_y – przyspieszenie akcelerometru mierzone wzdłuż osi Y .

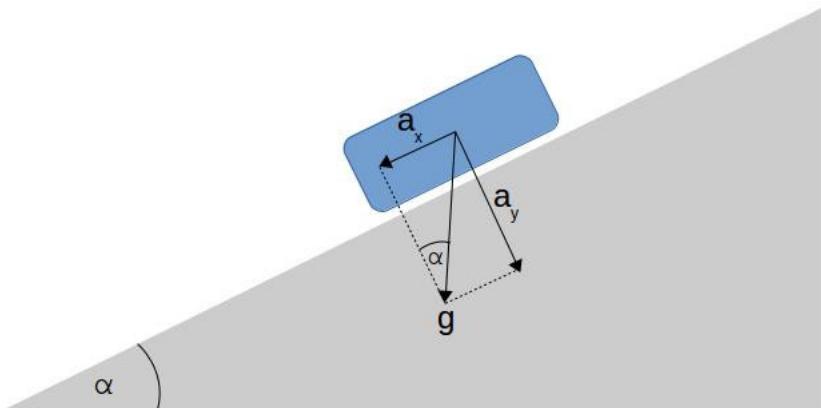
Z zależności (3.10) można wyznaczyć wartość miary łukowej kąta wyrażonej w radianach. W odniesieniu do kąta nachylenia podłoża, po którym porusza się rower, zdecydowanie bardziej intuicyjną jednostką

są stopnie. Przekształcenie miary kąta wyrażonej w radianach na miarę kąta wyrażoną w stopniach opisane jest poniższą zależnością:

$$\alpha_{deg} = \frac{180\alpha}{\pi} \quad (3.11)$$

gdzie:

α_{deg} – kąt nachylenia wyrażony w stopniach.



Rys. 3.4. Równia pochyła - przykład ilustrujący sposób wyznaczenia kąta nachylenia terenu.

3.4.2. Analiza danych pomiarowych żyroskopu

Zgodnie z zależnością (3.4) prędkość kątowa określana jest jako zmiana drogi kątowej w czasie. Sytuacja odwrotna, czyli wyznaczenie drogi kątowej na podstawie pomiarów prędkości kątowej polega na znalezieniu funkcji odwrotnej:

$$\alpha = \int \omega_z(t) dt \quad (3.12)$$

gdzie:

$\omega_z(t)$ – prędkość kątowa wzdłuż osi Z żyroskopu.

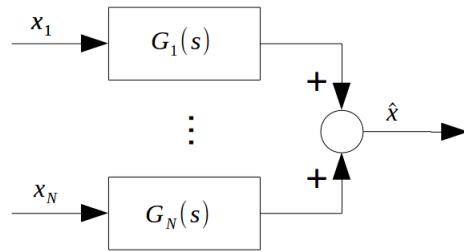
Podobnie, jak zależność (3.10), równanie (3.12) pozwala wyznaczyć miarę łukową wyrażoną w radianach.

Operacja całkowania prędkości kątowej została uwzględniona w projekcie filtra komplementarnego w postaci dodatkowego członu całkującego, którego transmitancja operatorowa wynosi $\frac{1}{s}$ - wzór (3.16) w pkt. 3.4.3.

3.4.3. Filtr komplementarny

Zasada działania filtra komplementarnego polega na odpowiedniej fuzji danych pochodzących z różnych czujników pomiarowych. Sygnał każdego z nich zawiera istotną informację o mierzonej wielkości

jak również zakłócenia, które powinny zostać wyeliminowane. Fuzja danych polega na zastosowaniu odpowiednich filtrów, dolnoprzepustowych, średkowoprzepustowych i górnoprzepustowych, które eliminują zakłócenia charakterystyczne dla danego czujnika, jednocześnie przenosząc informacje użyteczne. Warunkiem koniecznym uzyskania dokładniejszych wartości estymowanych, od wartości mierzonych, jest zastosowanie czujników pomiarowych o różnej charakterystyce częstotliwości błędów pomiarowych. Schemat przedstawiający ogólną ideę filtra komplementarnego zamieszczono na rys 3.5.

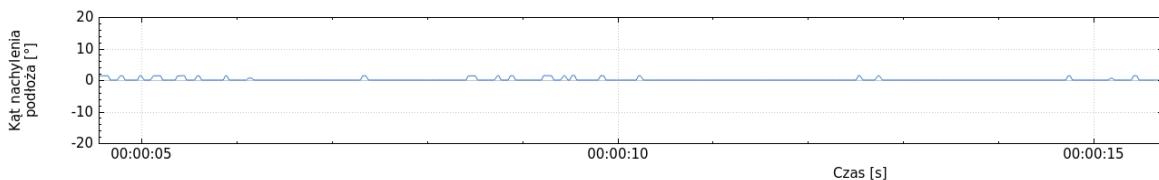


Rys. 3.5. Zasada działania filtra komplementarnego. $x_1 : x_N$ - sygnały wejściowe, $G_1(s) : G_N(s)$ - transmitancje operatorowe poszczególnych filtrów, \hat{x} - estymowana wartość wyjściowa.

Zaprojektowany filtr nie powinien wprowadzać dodatkowej dynamiki - transmitancja operatorowa, określająca stosunek transformaty Laplace'a sygnału wyjściowego do transformaty Laplace'a sygnału wejściowego, powinna spełniać zależność [16]:

$$G(s) = \sum_{i=1}^N G_i(s) = 1 \quad (3.13)$$

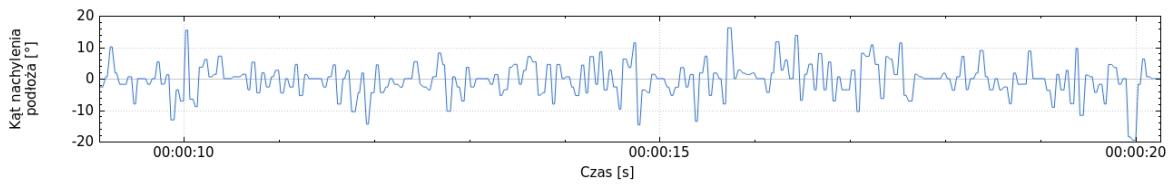
W odniesieniu do estymacji wartości kąta nachylenia podłoża, schemat filtra komplementarnego, wykorzystującego wartości kątów wyznaczonych na podstawie danych pomiarowych pochodzących z akcelerometru oraz żyroskopu, przedstawiony został na rys 3.9.



Rys. 3.6. Kąt nachylenia podłoża wyznaczony na podstawie pomiaru składowych przyspieszenia ziemskiego, akcelerometr pozostaje w spoczynku.

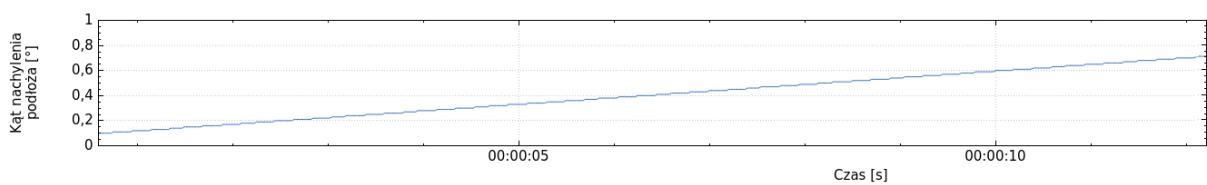
Pomiar składowych przyspieszenia ziemskiego umożliwia wyznaczenie kąta nachylenia podłoża (pkt. 3.4.1). Ta metoda znajduje swoje zastosowanie wtedy, gdy układ pomiarowy nie porusza się lub porusza się ruchem jednostajnym. Na rysunku 3.6 przedstawiono przebieg wartości kąta nachylenia, gdy akcelerometr pozostaje w spoczynku a kąt nachylenia wynosi 0° . Zaobserwowano minimalne chwilowe odchyłki wartości kąta nachylenia.

W ruchu przyspieszonym dane pomiarowe akcelerometru uwzględniają siły powodujące ten ruch, a brak możliwości odseparowania składowych przyspieszenia ziemskiego sprawia, że kąt nachylenia obarczony jest błędem. Należy zatem zastosować filtr dolnoprzepustowy, eliminujący szybkozmienne wartości kąta nachylenia pochodzące z akcelerometru. Na rysunku 3.7 przedstawiono przebieg wartości kąta nachylenia, gdy akcelerometr poruszał się ruchem posuwisto-zwrotnym po płaskiej powierzchni. Kąt nachylenia nie ulega zmianie, jednak ze względu na siły, zakłócające pomiar przyspieszenia ziemskiego, można zaobserwować bardzo duże błędy wartości kąta nachylenia podłożą, osiągające nawet 20° .



Rys. 3.7. Kąt nachylenia podłoża wyznaczony na podstawie pomiaru składowych przyspieszenia ziemskiego, akcelerometr porusza się ruchem posuwisto-zwrotnym.

Żyroskop służy do pomiaru prędkości obrotowej. Całkowanie prędkości obrotowej umożliwia wyznaczenie kąta nachylenia podłoża (pkt. 3.4.2). Jednak zakłócenia toru pomiarowego oraz wrażliwość na warunki pracy, a w szczególności temperaturę, powodują zjawisko tzw. dryfu żyroskopowego, przedstawionego na rys. 3.8. Dryf spowodowany jest ciągłym narastaniem błędów, w wyniku całkowania zakłóconych danych pomiarowych. Można zaobserwować, że na rys. 3.8 wartość kąta nachylenia podłoża rośnie, pomimo iż żyroskop pozostaje w spoczynku a kąt nachylenia nie ulega zmianie. Błędy powstałe w wyniku dryfu żyroskopowego są sygnałami wolnozmiennymi. Zastosowanie filtra górnoprzepustowego pozwala je wyeliminować.



Rys. 3.8. Zjawisko dryfu żyroskopu.

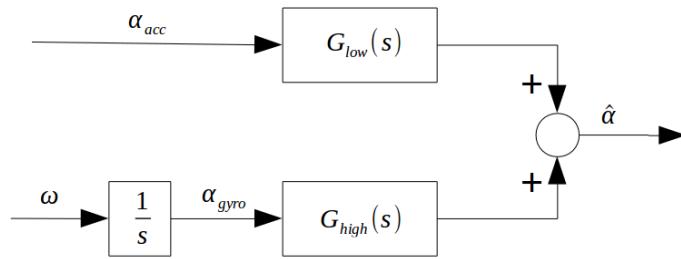
Filtr dolnoprzepustowy może zostać zrealizowany poprzez obiekt inercyjny I rzędu (pkt. 3.2):

$$G_{low}(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (3.14)$$

Zgodnie z równaniem (3.13), filtr górnoprzepustowy powinien spełniać zależność:

$$G_{high}(s) = 1 - G_1(s) = \frac{Ts}{Ts + 1} \quad (3.15)$$

Transmitancja $G_{high}(s)$ odpowiada transmitancji filtru górnoprzepustowego RC.



Rys. 3.9. Schemat filtru komplementarnego estymującego wartość kąta nachylenia podłoża.

Estymowana wartość kąta nachylenia $\hat{\alpha}$ spełnia zależność:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{Ts+1}\alpha_{acc} + \frac{Ts}{Ts+1}\frac{1}{s}\omega = \frac{\alpha_{acc} + T\omega}{Ts+1} \quad (3.16)$$

gdzie:

$\hat{\alpha}$ – estymowana wartość kąta nachylenia,

α_{acc} – kąt nachylania wyznaczony na podstawie danych z akcelerometru,

ω – prędkość obrotowa.

Ze względu na potrzebę zaimplementowania filtru w układzie mikroprocesorowym, należy znaleźć równoważny model dyskretny, który aproksymuje własności dynamiczne modelu ciągłego. Można tego dokonać stosując metodę Eulera wstecz [17]:

$$s = \frac{t_0 z}{z - 1} \quad (3.17)$$

gdzie:

t_0 – długość kroku dyskretyzacji.

Podstawiając zależność (3.17) do równania (3.16) oraz przyjmując podstawienie $p = \frac{T}{T+t_0}$, gdzie T to stała czasowa filtru, równanie różnicowe estymujące wartość kąta nachylania podłoża przyjmuje postać:

$$\hat{\alpha}_k = p(\hat{\alpha}_{k-1} + \omega_k t_0) + (1 - p)\alpha_{acc} \quad (3.18)$$

4. Zasada działania sterownika układu

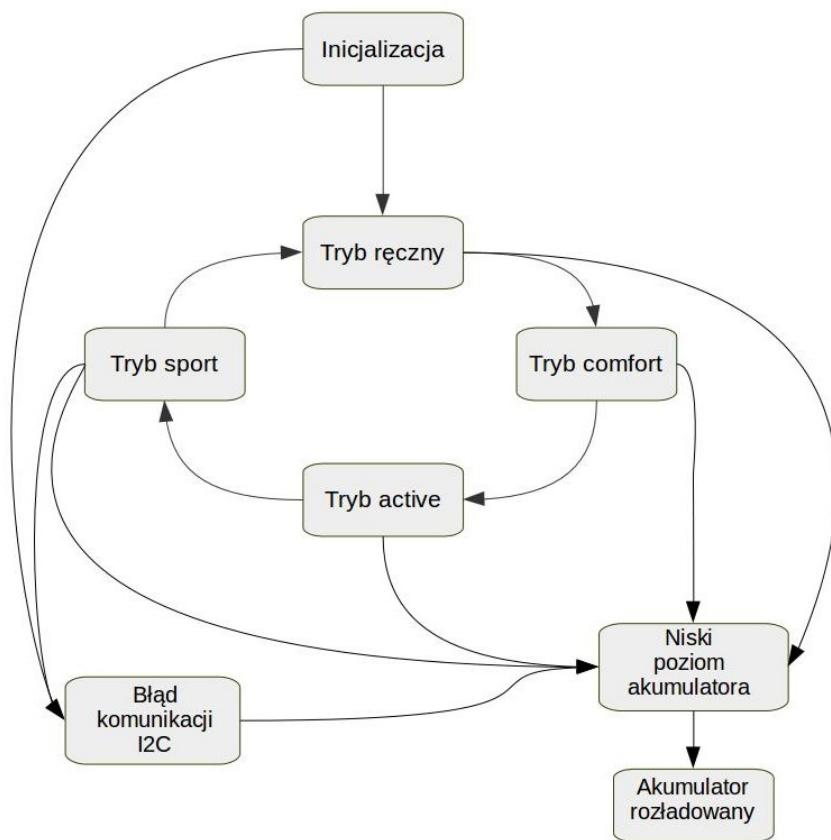
W niniejszym rozdziale zaprezentowano opis działania sterownika układu. Zdefiniowano wymagania dotyczące pracy każdego z czterech trybów jazdy oraz przedstawiono sposób informowania użytkownika o aktualnym stanie, w którym znajduje się sterownik układu.

4.1. Struktura programu

Cel projektu to wykonanie układu zmiany przełożeń, który oferuje dwa tryby pracy - tryb ręczny oraz automatyczny. Autor zdecydował, że w ramach trybu automatycznego wykonany zostanie podział na tryby: comfort, active i sport. Inspiracją takiego rozwiązania jest branża motoryzacyjna, w której coraz częściej można spotkać układy automatycznej zmiany przełożeń, oferujące możliwość profilowania charakterystyki działania zmiany biegów, poprzez wybór jednego z trybów jazdy.

Zasada działania programu przedstawiona została na rys. 4.1 i może być porównana do zasady działania skończonej maszyny stanów. Maszyna stanów jest pojęciem abstrakcyjnym, które definiuje zachowanie systemu jako skończony zbiór stanów oraz przejść pomiędzy stanami. Autor rozważał wykorzystanie systemu czasu rzeczywistego freeRTOS, w którym poszczególne stany będą odpowiadały nowym zadaniom, odpalanym sekwencyjnie. Jednak właśnie ze względu na sekwencyjne wykonywanie głównych zadań oraz brak ostrych wymagań czasowych, pomysł ten został odrzucony. Program działa na prostej zasadzie pętli nieskończonej, w której poszczególne zadania wyzwalane są przez układy czasowo-licznikowe. Dlatego porównanie programu do skończonej maszyny stanów odnosi się jedynie do wysokopoziomowego opisu zasady działania kontrolera.

Cztery stany odpowiadają zaprojektowanym trybom jazdy - tryb ręczny, comfort, active oraz sport. Przejścia pomiędzy tymi stanami następują w wyniku naciśnięcia przycisku zmiany aktualnego trybu jazdy. Kolejność przejść przedstawiona została na rys. 4.1. Wyróżnione zostały również trzy stany alarmowe: błąd komunikacji I2C, niski poziom naładowania pakietu zasilającego i rozładowanie pakietu zasilającego.



Rys. 4.1. Schemat ilustrujący zasadę działania programu kontrolera.

4.2. Opis stanów programu

4.2.1. Inicjalizacja układów peryferyjnych mikrokontrolera

Stan inicjalizacji jest stanem początkowym programu, osiąganym jednokrotnie, po włączeniu zasilania. W tym stanie przeprowadzana jest inicjalizacja następujących układów peryferyjnych:

- Porty wejściowe odpowiedzialne za obsługę przycisków do zmiany przełożeń oraz czujników magnetycznych,
- Porty wyjściowe odpowiedzialne za generowanie sygnału sterującego serwomechanizmem oraz sterowanie wskaźnikiem RGB aktualnego stanu programu,
- Inercyjna jednostka pomiarowa,
- Układy czasowo licznikowe, które inicjują zadania okresowe oraz wykorzystywane są do pomiaru prędkości obrotowej i kadencji.

W przypadku, gdy inicjalizacja wszystkich układów przebiegnie bez błędów, następuje przejście do następnego stanu - tryb ręczny. Jeśli inicjalizacja jednostki pomiarowej IMU nie powiedzie się, zgłoszony jest błąd komunikacji I2C.

4.2.2. Tryb ręczny

Tryb ręczny jest pierwszym stanem, w którym użytkownik może korzystać z funkcjonalności układu zmiany przełożeń. Zasada działania odpowiada w pełni mechanicznemu układowi. W tym trybie obsługiwane są jedynie przyciski do zmiany przełożeń. Oprogramowanie umożliwia jednokrotną zmianę przełożenia, aktywowaną poprzez naciśnięcie odpowiedniego przycisku. Dodatkowo zaimplementowana została ciągła zmiana przełożeń, która uruchamiana jest poprzez naciśnięcie i przytrzymanie odpowiedniego przycisku. Przełożenia zmieniane są co 0.7 sekundy, więc użytkownik ma odpowiednio dużo czasu do zatrzymania zmiany na odpowiednim przełożeniu.

Naciśnięcie przycisku zmiany trybu pracy układu powoduje przejście do kolejnego stanu - trybu comfort.

4.2.3. Tryb comfort

Stan comfort odpowiada pierwszemu z zaimplementowanych trybów automatycznej zmiany przełożeń. Ten tryb jest przeznaczony do spokojnego przemieszczania się na rowerze po płaskim terenie. Jest to najprostszy z trybów automatycznych, w którym użytkownik nie powinien angażować się w podejmowanie wyboru przełożenia. Możliwość zmiany ręcznej jest wyłączona. Mierzona jest jedynie chwilowa wartość kadencji. Płaski charakter trasy sprawia, że cykliczne zadanie, w trakcie którego dobierane jest przełożenie, zależne od wartości kadencji, uruchamiane jest z niską częstotliwością. Zakres kadencji jest stały dla każdego przełożenia i dobrany w taki sposób, aby umożliwić spokojną i komfortową jazdę na rowerze. W trakcie przejazdów testowych Autor uznał, iż jazda komfortowa odpowiada utrzymaniu kadencji w zakresie od 45 do 60 obrotów na minutę.

4.2.4. Tryb active

Stan active odpowiada drugiem z zaimplementowanych trybów automatycznej zmiany przełożeń. Autor założył, iż ten tryb powinien być używany na trasach o zróżnicowanej topografii terenu. Dlatego zadanie cykliczne dla tego trybu uruchamiane jest z większą częstotliwością, niż w przypadku trybu comfort - raz na dwie sekundy. Zakres kadencji jest stały dla każdego przełożenia. Ze względu na zmienną topografię terenu, został rozszerzony względem trybu comfort i wynosi od 55 do 70 obrotów na minutę. Możliwa jest również ręczna zmiana przełożeń, która wskazuje na chęć przejęcia kontroli nad przełożeniami przez użytkownika. W takiej sytuacji zadanie cykliczne wyłączane jest na 10 sekund. W tym czasie kontroler nie ma wpływu na dobór przełożeń. W tym trybie brana pod uwagę jest również chwilowa wartość prędkość roweru. Jeśli zostanie wykryty brak obrotów mechanizmu korbowego, następuje

automatyczny dobór przełożenia, zgodny z tabelą 4.1, które zostanie ustawione w momencie wznowienia pedałowania. Ma to na celu umożliwienie zmiany o kilka przełożień w przypadku, gdy rozpoczął się zjazd, a użytkownik przerwał pedałowanie. Ponowne wznowienie pedałowania skutkuje natychmiastowym doborem przełożenia dostosowanym do aktualnej prędkości, bez potrzeby przechodzenia przez poszczególne biegi.

Tabela 4.1. Związek pomiędzy zakresem prędkości a przełożeniem dobieranym po wznowieniu pedałowania:

Zakres prędkości [$\frac{km}{h}$]	[0,2)	[2, 5)	[5,10)	[10,14)	[14,18)	[18,22)	[22,26)	[26, 100]
Nr przełożenia	1	2	3	4	5	6	7	8

4.2.5. Tryb sport

Stan sport odpowiada ostatniemu z zaimplementowanych trybów automatycznej zmiany przełożień. Tryb ten powinien być używany w trakcie bardzo dynamicznej jazdy na rowerze, której celem jest przejechanie danej trasy w bardzo szybkim tempie. Zadanie cykliczne tego trybu jazdy uruchamiane jest z taką samą częstotliwością, jak w przypadku trybu active. Autor podjął taką decyzję, ponieważ uważa, iż częstsze zmiany przełożień w rowerze są nieefektywne. Zamiast skupić się na generowaniu mocy, użytkownik skupia się na szybkiej pracy układu zmiany przełożień. Tak jak w trybie active, możliwa jest ręczna zmiana przełożień, która implikuje wyłączenie kontrolera na 10 sekund. Przełożenia dobierane są w zależności od wartości kadencji. W przeciwieństwie do pozostałych trybów, zakresy kadencji nie są stałe. Powstało wiele prac poruszających zagadnienie doboru optymalnej kadencji w kolarstwie [18], [19]. Ze względu na mnogość wskaźników jakości przyjętych w trakcie przeprowadzonych badań, zróżnicowaną charakterystykę poszczególnych wyścigów czy personalne predyspozycje zawodników, nie można wyznaczyć jednej wartości optymalnej dla wszystkich przypadków. Jednak wskazuje się na to [18], że zakres kadencji na odcinkach płaskich, wynoszący od 80 do 100 obrotów na minutę, pozwala zachować odpowiedni kompromis pomiędzy osiągami a wydajnością zawodnika. W przypadku podjazdów zaleca się obniżenie kadencji do około 70 obrotów na minutę. Są to zalecenia dotyczące kolarzy zawodowych, których osiągi znacznie przewyższają możliwości normalnych użytkowników. Zdecydowano, że zakresy kadencji w trybie sport będą uzależnione od kąta nachylenia terenu trasy rowerowej i zostaną obniżone względem wartości wymienianych w literaturze. Rozróżniane zatem są 3 możliwości doboru zadanej kadencji:

- Nachylenie terenu jest mniejsze niż -3° . Oznacza to zjazd ze zbocza o nachyleniu większym, bądź równym 5%. Zakres kadencji jest obniżony względem jazdy po płaskim terenie i wynosi od 55 do 70 obrotów na minutę.

- Nabylenie terenu należy do zakresu od -3° do 3° . Oznacza to jazdę po względnie płaskim terenie. Zakres kadencji wynosi od 70 do 85 obrotów na minutę.
- Nabylenie terenu jest większe niż 3° . Oznacza to podjazd pod zbocze o nabyleniu większym bądź równym 5%. Zakres kadencji jest podwyższony względem jazdy po płaskim terenie i wynosi od 55 do 70 obrotów na minutę.

4.2.6. Błąd komunikacji I2C

Przejście do tego stanu może nastąpić w dwóch przypadkach. Pierwszy z nich to problemy z komunikacją w trakcie inicjalizacji jednostki pomiarowej wynikające z braku fizycznego połączenia pomiędzy jednostką pomiarową a portami mikrokontrolera. Drugi to problemy związane z odczytem danych w trybie sport. W tym przypadku może również dojść do problemów z komunikacją. Druga przyczyną mogą być niepoprawne wartości zwracane przez czujniki, świadczące o ich uszkodzeniu.

Problemy z komunikacją objawiają się brakiem odpowiedzi jednostki pomiarowej na rozkazy wysyłane przez mikrokontroler. Przed każdą próbą komunikacji odpalany jest układ czasowo-licznikowy. Jeśli odpowiedź od jednostki przyjdzie w krótszym czasie, niż jedna sekunda po wysłaniu zapytania, układ mierzący czas jest wyłączany. W przeciwnym przypadku wykryty zostaje błąd komunikacji.

4.2.7. Niski poziom oraz rozładowanie pakietu

Obydwaj stany odnoszą się do problemu z pakietem zasilającym. Niski poziom naładowania odnotowywany jest wtedy, gdy napięcie pakietu zasilającego spadnie poniżej 6.8V. Następuje wtedy ograniczenie funkcjonalności systemu w celu oszczędności energii. Program przechodzi do stanu ręcznej zmiany przełożeń. Tryby automatycznej zmiany zostają wyłączone. W efekcie nie są obsługiwane żadne czujniki pomiarowe.

Jeśli napięcie pakietu zasilającego spadnie poniżej 6V, kontroler przechodzi w tryb pracy z rozładowanym pakietem zasilającym. Jest to tryb maksymalnej oszczędności energii. Wyłączona zostaje możliwość zmiany przełożeń. Działa jedynie dioda RGB sygnalizująca rozładowanie pakietu.

Autor zakłada, że następstwem osiągnięcia tych stanów jest naładowanie pakietu zasilającego. Nie ma zatem możliwości powrotu z tych stanów do normalnej pracy układu. Tak samo dzieje się w przypadku problemów z jednostką pomiarową.

4.2.8. Wskaźnik aktualnego trybu

Wskaźnik aktualnego stanu, w którym znajduje się kontroler, jest istotnym elementem układu. Umożliwia użytkownikowi sprawdzenie aktualnego trybu jazdy oraz informuje o stanach alarmowych. Autor uznał, iż dobrym wskaźnikiem aktualnego stanu będzie dioda RGB, która pozwala na zakodowanie wszystkich stanów w postaci odpowiednich kolorów. Taka reprezentacja stanów, w porównaniu np. do wyświetlacza, wydaje się być bardziej efektywna w trudnym terenie, gdzie rower narażony jest na duże

Tabela 4.2. Kodowanie stanu programu w postaci kolorów RGB:

Stan programu	Kolor RGB
Inicjalizacja	biały
Tryb ręczny	żółty
Tryb comfort	zielony
Tryb active	niebieski
Tryb sport	różowy
Niski poziom naładowania pakietu	czerwony migający
Pakiet rozładowany	czerwony
Błąd komunikacji I2C	biały migający

wstrząsy i odczyt z ekranu mógłby zabrać więcej czasu. Do tego montaż prostej diody w okolicy kierownicy jest zdecydowanie prostszy i mniej narażony na uszkodzenia. Kodowanie stanów w postaci kolorów diody RGB przedstawione zostało w tabeli 4.2.

5. Realizacja projektu

Niniejszy rozdział zawiera opis przebiegu realizacji projektu. Pokróćce zaprezentowano narzędzia programistyczne wykorzystane w trakcie prac na projektem. Przedstawiono wykaz podzespołów wraz z krótką charakterystyką, szczegóły dotyczące modyfikacji przerzutki, integracji elementów elektronicznych oraz implementacji głównych funkcjonalności sterownika.

5.1. Narzędzia programistyczne

Komputer klasy PC stanowi podstawę środowiska do rozwoju aplikacji na wybraną platformę sprzętową oraz do przeprowadzania testów wykonanego układu.

Program sterownika został napisany w języku C, który jest powszechnie wykorzystywany w aplikacjach wbudowanych. Język opracowany przez Dennisiego Ritchiego, w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku w Bell Laboratories [20]. Doskonale nadaje się do aplikacji niskopoziomowych ze względu na łatwą przenośność kodu, elastyczność oraz wysoką wydajność aplikacji napisanych w tym języku.

5.1.1. Code Composer Studio 6.0.0

Oprogramowanie sterownika rozwijane było w oparciu o zintegrowane środowisko programistyczne Code Composer Studio v6.0.0 oferowane przez Texas Instruments. Środowisko umożliwia wykonanie aplikacji na różne platformy sprzętowe TI. Są to m.in. mikrokontrolery z serii Tiva/Stellaris, procesory sygnałowe z rodziny TMS320 czy układy SOC(*ang. System On Chip*) serii DaVinci. CCS v6.0.0 łączy zalety środowiska Eclipse Kepler 4.3, które stanowi bazę CCS, z narzędziami do rozwijania aplikacji embedded, takimi jak kompilator ARM GNU Linaro, czy wbudowany debugger.

5.1.2. Biblioteka TivaWare Peripheral Driver

Texas Instruments dostarcza bibliotekę dedykowaną do mikrokontrolerów z rodziny Tiva ARM Cortex-M - TivaWare Peripheral Driver Library. Biblioteka stanowi zbiór funkcji umożliwiających wykorzystanie układów peryferyjnych mikrokontrolera. Biblioteka, napisana w języku C, wspiera dwa modele programowania mikrokontrolera - Direct Register Access oraz Software Driver Model. Pierwszy z nich operuje bezpośrednio na rejestrach mikrokontrolera, co pozwala pisać bardzo wydajne programy o niewielkim rozmiarze. Jednocześnie wymaga bardzo dużej znajomości rejestrów mikrokontrolera,

znaczenia poszczególnych bitów oraz zależności pomiędzy rejestrami. Software Driver Model działa na wyższym poziomie dając kontrolę nad całymi układami peryferyjnymi. Użytkownik nie musi znać dokładnej architektury mikrokontrolera, co znaczco przyspiesza proces rozwijania oprogramowania.

5.1.3. Pozostałe oprogramowanie

Pozostałe oprogramowanie wykorzystane w trakcie realizacji projektu to m.in.:

- Saleae Logic - oprogramowanie współpracujące z analizatorem stanów logicznych,
- Gnuplot - program do graficznej reprezentacji danych,
- Putty - klient usług Telnet, SSH i rlogin, wykorzystany do logowania danych,
- Eagle - program do projektowania układów elektronicznych,
- FreeCad - program do modelowania parametrycznego 3D,
- QT Creator - środowisko do projektowania interfejsu graficznego z wykorzystaniem biblioteki QT.

5.2. Wykaz podzespołów

5.2.1. Przerzutka tylna

Autor zdecydował się na wykorzystanie tylnej przerzutki SRAM X5 [21]. Głównym atutem tej przerzutki jest jej konstrukcja, która ze względu na długie ramiona wózka przerzutki, umożliwia bezproblemowe zamontowanie serwomechanizmu. Przerzutka oferuje pełny zakres ruchu do obsługi ośmiu przełożeń. Dodatkowo jest solidną propozycją z niskiej półki cenowej.

5.2.2. Serwomechanizm

Serwomechanizm odpowiedzialny za pozycjonowanie wózka przerzutki to Hitec Hs-8335SH. Jest to tzw. cyfrowy serwomechanizm, przeznaczony do zastosowań modelarskich. Od analogowych odpowiedników odróżnia się większą precyzją w osiąganiu zadanej pozycji oraz wyższym momentem obrotowym. Autor zdecydował się na zastosowanie gotowego serwomechanizmu z kilku powodów. Takie rozwiązanie zdecydowanie przyspieszyło prace nad projektem. W dodatku gotowy serwomechanizm charakteryzuje się kompaktowymi rozmiarami oraz odpornością na warunki atmosferyczne.

Parametry techniczne serwomechanizmu Hitec Hs-8335SH:

- Napięcie robocze [V]: 6-7.4,
- Moment obrotowy (7.4V)[kgcm]: 24,
- Prędkość (7.4V)[sek/60°]: 0.13,
- Metalowe tryby przekładni.

5.2.3. Mikrokontroler

Sterownik nadzorujący pracę całego układu został wykonany w oparciu o zestaw uruchomieniowy Texas Instruments Tiva C-Series EK-TM4C123GXL. Zestaw zawiera 32-bitowy mikrokontroler TM4C123GH6PM wykorzystujący rdzeń ARM Cortex-M4F [22]. Posiada wbudowany regulator 3.3V, port micro USB oraz wyprowadzenia niezbędnych portów I/O. Charakteryzuje się kompaktowymi rozmiarami. Mikrokontroler zastosowany w zestawie oferuje wysoką wydajność oraz niski pobór prądu. Kontroler przerwań sprzętowych NVIC (ang. *Nested Vectored Interrupt Controller*) umożliwia efektywne zarządzanie przerwaniami w zależności od zaprogramowanych priorytetów [22].

Parametry techniczne mikrokontrolera:

- Zegar systemowy taktowany z częstotliwością do 80 MHz,
- Rdzeń ARM Cortex-M4F,
- Obsługuje zestaw instrukcji Thumb2,
- Pamięć flash 256kB,
- Pamięć SRAM 32kB,
- 43 porty I/O,
- Generator sygnału PWM,
- Kontroler DMA,
- Kontroler transmisji szeregowej(USB 2.0, UART, I2C, SPI, CAN),
- Układy czasowo-licznikowe.

5.2.4. Czujniki pomiarowe

5.2.4.1. Pololu AltIMU 10

Pololu AltIMU10 to inercyjna jednoskta pomiarowa, w skład której wchodzą czujniki wykonane w technologii MEMS:

- trzyosiowy akcelerometr ST LSM303DLHC,
- trzyosiowy żyroskop ST L3GD20,
- trzyosiowy magnetometr ST LSM303DLHC.

Wszystkie czujniki zamontowane w jednostce komunikują się z urządzeniem nadzawanym z wykorzystaniem magistrali I2C(ang. *Inter-Integrated Circuit*). Magistrala I2C jest szeregowym, dwukierunkowym interfejsem komunikacyjnym opracowanym przez firmę Philips. Układ AltImu10 posiada elementy pasywne, gwarantujące poprawne działanie magistrali, oraz wbudowany regulator napięcia [23].

5.2.4.2. Zbliżeniowe czujniki magnetyczne

Zbliżenie czujniki załączane magnetycznie, o oznaczeniu CMD14, wykorzystane są do wyznaczania prędkości obrotowych tylnego koła oraz mechanizmu korbowego. W wyniku działania pola magnetycznego, pochodzącego z magnesu trwałego, czujnik zwiera swoje styki.

Parametry techniczne:

- Maksymalne napięcie pracy [V] : 50,
- Maksymalny prąd [A]: 0.1,
- Maksymalny zasięg [mm]: 25,
- Styk normalnie otwarty.

5.2.5. Układ zasilania

Źródłem zasilania całego układu jest pakiet litowo-polimerowy BRAINERGY 1000mAh. Parametry techniczne pakietu zasilającego:

- Pojemność [mAh]: 1000,
- Liczba ogniw: 2,
- Napięcie robocze [V]: 7.4,
- Wydajność prądowa [A]: 45.

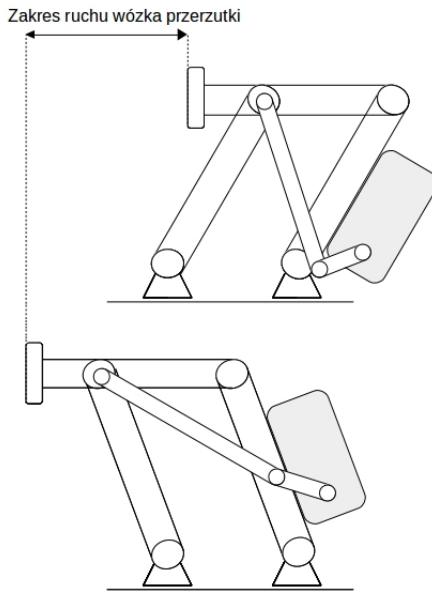
Dodatkowo zastosowany został regulator napięcia obniżający wartość napięcia pakietu do 5V, które jest źródłem zasilania zestawu uruchomieniowego EK-TM4C123GXL.

5.3. Modyfikacja przerzutki

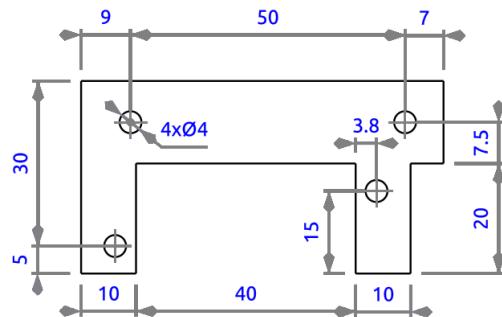
Zasada działania serwomechanizmu kontrolującego pozycję wózka została przedstawiona na rys. 5.1. Zmiana pozycji wału serwomechanizmu implikuje zmianę pozycji wózka poprzez zastosowanie sztywnego połączenia przegubowego.

Przymocowanie serwomechanizmu do przerzutki, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 5.1 można podzielić na kilka etapów. Pierwszy etap to usunięcie sprężyny, która występuje w konwencjonalnych przerzutkach tylnych. Wiąże się to ze zniszczeniem połączeń nitowych do których przymocowana jest sprężyna. Zniszczone połączenia nitowe zastąpione zostały przez połączenia śrubowe. Wykorzystane zostały śruby z gwintem metrycznym M4 o średnicy 4 mm.

Następny etap to wykonanie elementu mocującego serwomechanizm do przerzutki. Element został wykonany zgodnie z projektem przedstawionym na rysunku technicznym 5.2.



Rys. 5.1. Zasada działania przerzutki rowerowej z wykorzystaniem serwomechanizmu.



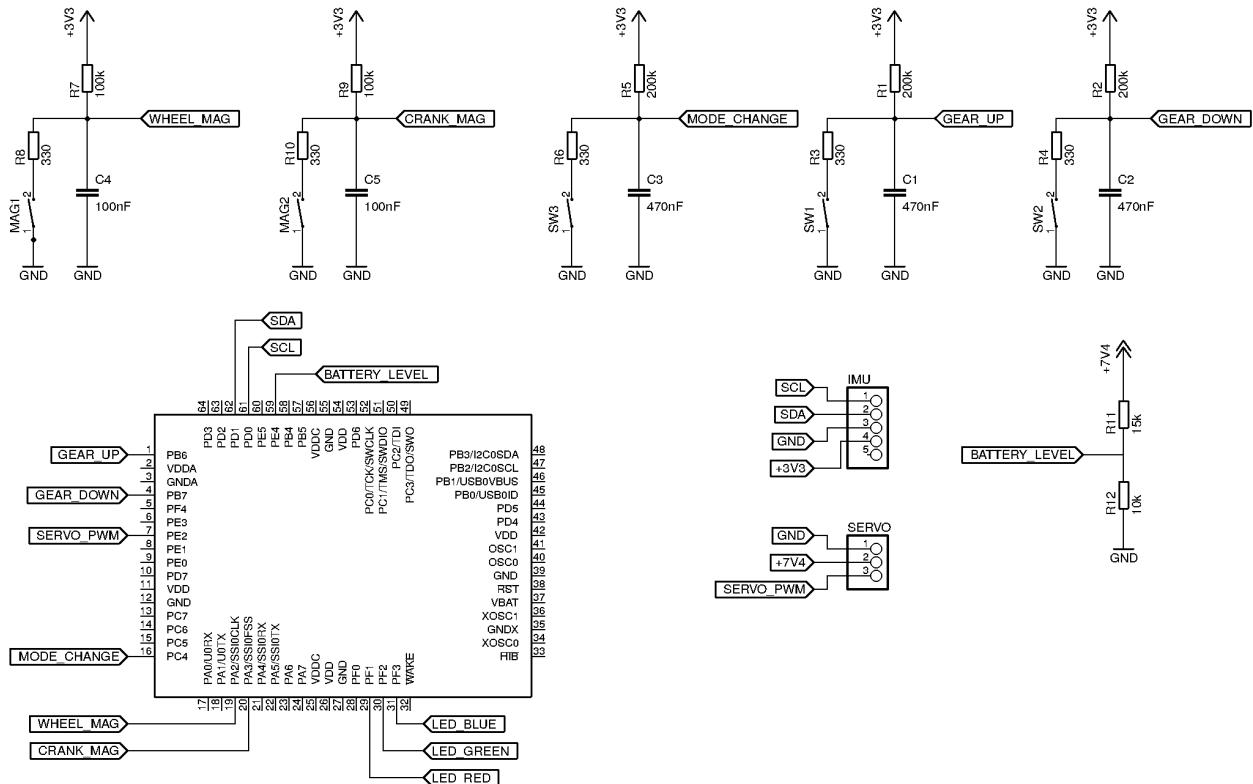
Rys. 5.2. Rysunek techniczny elementu mocującego serwomechanizm do przerzutki.

Wykonany element wraz z połączeniami śrubowymi umożliwia przyjmocowanie serwomechanizmu Hitec Hs-8335SH do przerzutki SRAM X5. Ostatni etap tej części projektu to wykonanie połączenia przegubowego łączącego wał serwomechanizmu z jednym z członów ruchomych przerzutki. Autor zdecydował się na zastosowanie modelarskiego drążka kierowniczego o zmiennej długości oraz dedykowanego aluminiowego orczyka serwomechanizmu. Takie rozwiązanie pozwala dokładnie dopasować długość połączenia, bez konieczności projektowania oraz wykonania dodatkowych elementów.

W wyniku powyższych czynności powstała w pełni funkcjonalna przerzutka tylna sterowana przy użyciu serwomechanizmu.

5.4. Integracja elementów elektronicznych

Mikrokontroler, filtry RC, pakiet zasilający, regulator napięcia oraz jednostka pomiarowa IMU zamontowane zostały w hermetycznej puszce elektrycznej, przymocowanej na stałe do dolnej rury przedniego trójkąta ramy rowerowej.



Rys. 5.3. Schemat połączeń elementów elektronicznych.

Schemat połączeń znajduje się na rys. 5.3. Na schemacie przedstawione zostały jedynie elementy wykonane przez Autora pracy. Są to filtry RC, dzielnik napięcia do pomiaru stanu pakietu zasilającego, połączenia do sterowania serwomechanizmem oraz połączenia do komunikacji z jednostką pomiarową IMU. Szczegóły związane z dystrybucją zasilania zostały pominięte, ponieważ są elementem zestawu uruchomieniowego. Można je znaleźć w dokumentacji urządzenia [24]. Ze względu na rozwojowy charakter projektu oraz częste zmiany wprowadzane na etapie realizacji, autor pracy nie zdecydował się na wykonanie dedykowanego obwodu drukowanego.

Tabela 5.1. Funkcje portów I/O przedstawionych na schemacie połączeń elementów elektronicznych:

Nazwa sygnału	Funkcja
GEAR_UP	Obsługa przycisku zwiększającego przełożenie
GEAR_DOWN	Obsługa przycisku zmniejszającego przełożenie
SERVO_PWM	Generowanie sygnału sterującego pozycją serwomechanizmu
MODE_CHANGE	Obsługa przycisku zmiany trybu pracy sterownika
WHEEL_MAG	Obsługa czujnika magnetycznego do pomiaru prędkości kątowej koła roweru
CRANK_MAG	Obsługa czujnika magnetycznego do pomiaru kadencji
BATTERY_LEVEL	Odczyt pomiaru poziomu napięcia
SCL	Obsługa linii zegarowej magistrali I2C
SDA	Obsługa linii danych magistrali I2C

5.5. Implementacja głównych funkcjonalności

5.5.1. Kontrola serwomechanizmu

Pozycja serwomechanizmu modelarskiego sterowana jest przez sygnał PWM (ang. *Pulse-Width Modulation*). Jest to metoda regulacji sygnałem napięciowym, o stałej częstotliwości i amplitudzie, polegająca na zmianie wypełnienia sygnału. Częstotliwość sygnału wynosi 50Hz. Wartości napięcia, które zmieniają się w sposób skokowy, wynoszą 0 i 3.3V. Pełny zakres ruchu serwomechanizmu osiągalny jest przez zmianę wypełnienia sygnału sterującego z zakresu od 2.5 do 12.5 %. Innymi słowy - podanie prostokątnego sygnału sterującego o okresie 20ms, w którym stan wysoki utrzymany jest przez czas z zakresu od 0.5ms do 2.5 ms, umożliwia obrót wału serwomechanizmu z zakresu od 0 do 180°.

Przerzutka, do której został przymocowany serwomechanizm, ogranicza pełny zakres ruchu serwomechanizmu. Minimalne oraz maksymalne wychylenie wózka przerzutki wiąże się z obrotem wału serwomechanizmu odpowiednio o kąt 31 i 95°. W tym zakresie obsługiwane są wszystkie dostępne przełożenia. Każdemu z ośmiu przełożen odpowiada inna pozycja serwomechanizmu (tabela 5.2). Pozycje serwomechanizmu zostały dobrane eksperymentalnie. Można zaobserwować liniowy przyrost czasu wypełnienia sygnału.

Z doświadczenia autora pracy wynika, że zmiana przełożen w konwencjonalnych układach napędowych działa znacznie lepiej, jeśli w trakcie zmiany biegu następuje chwilowe przeciągnięcie pozycji wózka przerzutki. Jest to szczególnie dobrze widoczne w trakcie redukowania przełożenia, kiedy łańcuch

Tabela 5.2. Pozycja serwomechanizmu oraz czas wypełnienia sygnału PWM w zależności od aktualnego przełożenia:

Nr przełożenia	Pozycja serwomechanizmu [°]	Czas wypełnienia sygnału [us]
1	31.5	850
2	40.5	950
3	49.5	1050
4	58.5	1150
5	67.5	1250
6	76.5	1350
7	85.5	1450
8	94.5	1550

powinien trafić na koło zębate o większej średnicy. Można wtedy zaobserwować opóźnienie w zmianie przełożenia, niekorzystne przeskoki łańcucha pomiędzy kołami zębatymi, a w źle wyregulowanych układach napędowych może nawet dochodzić do braku reakcji układu napędowego. Takie zjawisko zostało zaobserwowane w trakcie pracy nad projektem. Zmiana biegów polegająca na pozycjonowaniu serwomechanizmu w nowej pozycji, zależnej od dobranego przełożenia, działała z wyraźnym opóźnieniem. Problem, podobnie jak w układach mechanicznych, został rozwiązany przez chwilowe przeciągnięcie pozycji wózka przerzutki. Zdefiniowanie zostały dwa pomocnicze zestawy pozycji serwomechanizmu, specyficzne dla redukowania oraz zwiększenia przełożenia (tabela 5.3). Wszystkie trzy zestawy pozycji przechowywane są w postaci tablic, które zawierają czasy wypełnienia sygnału sterującego. W momencie rozpoczęcia zmiany przełożenia, na skutek naciśnięcia przycisku lub w wyniku decyzji kontrolera automatycznej zmiany przełożień, zmienna, która do tej pory wskazywała na główny zestaw pozycji,aczyna wskazywać na jeden z zestawów pomocniczych zależny od rodzaju zmiany. Jednocześnie uruchomiony zostaje układ czasowo-licznikowy. Po upływie 500ms, w trakcie obsługi przerwania tego układu, następuje przypisanie adresu, pod którym znajduje się w pamięci główny zestaw parametrów. Następuje również wyłączenie układu czasowo-licznikowego.

5.5.2. Obsługa przycisków

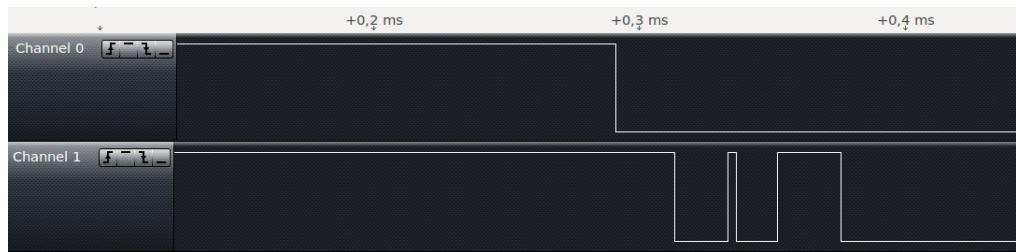
W projekcie wykorzystane zostały trzy przyciski przewlekane monostabilne. Ich naciśnięcie powoduje redukcję lub zwiększenie przełożenia oraz zmianę trybu pracy kontrolera. Przyciski do zmiany przełożenia zamontowane zostały w miejscu konwencjonalnej manetki. Przycisk do zmiany trybu pracy został przy mocowany do mostka kierownicy.

Tabela 5.3. Pomocnicze zestawy pozycji serwomechanizmu:

Nr przełożenia	Wypełnienie sygnału w trakcie redukcji przełożenia [us]	Wypełnienie sygnału w trakcie zwiększenia przełożenia [us]
1	800	900
2	900	1000
3	1000	1100
4	1100	1200
5	1200	1300
6	1300	1400
7	1400	1500
8	1500	1600

Wszystkie przyciski wykorzystują rezistor pull-up, podciągający do portu wejściowego napięcie 3,3V (rys. 5.3). Zwarcie przycisku powoduje ustalenie sygnału na poziomie 0V. Pojawienie się na magistrali zbocza opadającego powoduje zgłoszenie przerwania od odpowiedniego pinu portu wejściowego.

Z przyciskami związany jest problem drgań styków w trakcie zwierania/rozwierania przycisku. Są to drgania mechaniczne, które mogą trwać od kilku mikrosekund do nawet kilkunastu milisekund. Powoduje to niezdefiniowane zachowanie całego systemu, np. zmianę kilku przełożeń na raz. Szybkozmienne zmiany stanu logicznego sygnału, wynikające z drgań styków przycisku, przedstawione zostały na rys. 5.4. Istnieje kilka sposobów rozwiązywania tego problemu. Można je podzielić na sposoby programowe



Rys. 5.4. Porównanie przebiegów sygnałów interpretowanych przez analizator stanów logicznych dla przycisku z filtrem RC - kanał 0, oraz bez filtra- kanał 1.

oraz sprzętowe. Sposoby programowe to np. kilkukrotne sprawdzenie stanu portu wejściowego lub chwilowe wyłączenie przerwań od portów wejściowych. Autor zdecydował, że lepszym rozwiązaniem będzie usunięcie przyczyny tego zjawiska, czyli odpowiednie kondycjonowanie sygnału. W tym celu wykonane zostały proste filtry dolnoprzepustowe RC. Zasada działania filtru RC została opisana w pkt. 3.2. W dokumentacji mikrokontrolera można znaleźć informację na temat minimalnego poziomu napięcia, interpretowanego jako stan wysoki - $0.6V_{in}$ [22]. Podobny poziom napięcia osiągany jest na wyjściu filtru

RC, po skokowej zmianie napięcia wejściowego, po czasie równym stałej czasowej filtra. Autor założył, że zmiany biegów, oraz zmiana tryb jazdy, nie mogą być dokonywane częściej, niż 10 razy na sekundę. Z tego wynika, że stała czasowa filtra powinna wynosić około $100ms$. Wszystkie 3 filtry zostały wykonane w oparciu o opornik o rezystancji $200k\Omega$ i kondensator o pojemności $470nF$. Tak dobór elementów pasywnych pozwala zbudować filtr, którego stała czasowa wynosi około $94ms$.

5.5.3. Obsługa zbliżeniowych czujników magnetycznych

Zbliżeniowe czujniki magnetyczne działają w sposób analogiczny do przycisków monostabilnych. Różnica polega na tym, że styki zwierane są w wyniku działania zewnętrznego pola magnetycznego, pochodzącego od magnesu trwałego. W trakcie zwierania/rozwierania czujnika magnetycznego również pojawia się problem mechanicznych drgań styków. Problem został wyeliminowany w taki sam sposób, jak w przypadku przycisków - przez zastosowanie filtrów dolnoprzepustowych RC. Elementy pasywne filtrów RC Stałe dla czujników magnetycznych zostały dobrane zgodnie z poniższymi założeniami.

Czujnik magnetyczny, wykorzystany do wyznaczania chwilowej wartości prędkości roweru, korzysta z dwóch magnesów trwałych. Doświadczenia przeprowadzone z wykorzystaniem analizatora stanów logicznych przy dużych prędkościach obrotowych tylego koła wykazały, że drgania czujników magnetycznych trwają nie dłużej niż $1ms$. Autor założył, że maksymalna prędkość roweru możliwa do osiągnięcia to $100 \frac{km}{h}$, czyli około $28 \frac{m}{s}$. Promień koła roweru wynosi około $0.33m$. Z zależności (3.9) wynika, że dla prędkości maksymalnej, magnes trwały znajduje się w pobliżu czujnika magnetycznego co $37ms$. Należy uwzględnić również to, że w tym czasie dochodzi do zwarcia i rozwarcia czujnika magnetycznego. Stała czasowa filtra RC, powinna być zatem co najmniej dwa razy krótsza. Ostatecznie filtr RC został wykonany z opornika o rezystancji $100k\Omega$ i kondensatora o pojemności $100nF$, co zapewnia wartość stałej czasowej filtra na poziomie $10ms$. Wartość ta jest o rzad wielkości większa od zarejestrowanych okresów drgań, a jednocześnie zwarcie i rozwarcie czujnika z filtrem trwa prawie dwa razy krócej, niż okres obrotu magnesu trwałego dla przyjętej prędkości maksymalnej.

Czujnik magnetyczny wykorzystywany do wyznaczenia chwilowej wartości kadencji jest zwierany przez jeden magnes trwały, przymocowany do ramienia mechanizmu korbowego. Autor przyjął, że maksymalna kadencja możliwa do osiągnięcia przez rowerzystę, to $250 \frac{obr}{min}$. Pełny obrót przy takiej kadencji zajmuje $240ms$. Zastosowanie filtra o takiej samej stałej czasowej, jak filtr czujnika magnetycznego prędkości roweru, spełnia wymagania wynikające z przyjętego założenia o maksymalnej kadencji.

5.5.4. Obsługa jednostki pomiarowej Pololu AltIMU10

Dane pomiarowe pochodzące z akcelerometru oraz żyroskopu wykorzystywane są w trybie active i sport. Kąt nachylenia podłożu wyznaczany jest co $10ms$ przy użyciu filtra komplementarnego, którego zasadę działania opisano w pkt. 3.4.3.

Komunikacja pomiędzy mikrokontrolerem a jednostką pomiarową zachodzi przy użyciu magistrali I2C. Magistrala działa w tybie *standard mode*, w którym prędkość transmisji danych wynosi $100kb/s$. Jednostka pomiarowa posiada pięć pinów wyjściowych, jednak używane są tylko cztery:

- SCL (ang. *Serial Clock Line*) - linia zegarowa wykorzystana do synchronizacji transferu danych,
- SDA (ang. *Serial Data Line*) - linia danych wykorzystana do transferu danych,
- Vin - zasilanie jednostki pomiarowej, które przyjmuje napięcie z zakresu od 2.5V do 5.5V,
- GND - wspólna masa.

Komunikacja w standardzie I2C jest komunikacją typu master/slave. Urządzeniem nadzorującym, odpowiedzialnym za inicjowanie, prowadzenie oraz kontrolę transmisji, jest mikrokontroler. Urządzenia pomiarowe to urządzenia typu slave. Każdy z układów pomiarowych posiada swój unikalny, 7-bitowy adres. Każde z urządzeń typu slave udziela odpowiedzi na rozkazy wysyłane przez mikrokontroler. Adresy urządzeń jednostki pomiarowej:

Tabela 5.4. Adresy urządzeń pomiarowych:

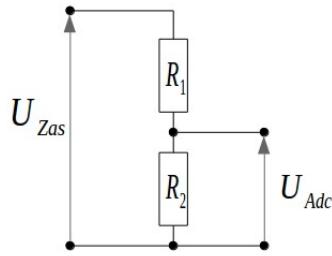
Urządzenie	Adres
Akcelerometr	0x19
Żyroskop	0x6B
Magnetometr	0x1E

Biblioteka TivaWare udostępnia metody do obsługi komunikacji I2C. Akcelerometr został skonfigurowany w taki sposób, aby obsługiwał zakres przyspieszeń $\pm 2g$. Żyroskop obsługuje zakres pomiarowy $\pm 245dps$.

5.5.5. Pomiar poziomu naładowania pakietu zasilającego

Układ do pomiaru poziomu naładowania baterii został zbudowany w oparciu o przetwornik analogowo-cyfrowy oraz dzielnik napięcia.

Napięcie robocze pojedynczego ogniw li-po wynosi 3.4V. W trakcie pracy ogniw napięcie może się zmieniać - od nawet 4.2V zaraz po naładowaniu ogniw do 3.0V w przypadku rozładowania. Pakiet zasilający układu składa się z dwóch ogniw li-po, zatem napięcie może przyjmować wartości od 6V do 8.8V. Pomiar tej wielkości przez przetwornik analogowo-cyfrowy nie jest możliwy, gdyż przekracza maksymalne dopuszczalne napięcie na porcie wejściowym mikrokontrolera, które wynosi 5.5V [22]. W celu obniżenia napięcia zastosowany został dzielnik napięcia. Dzielnik napięcia to czwórnik, który pozwala zapewnić odpowiedni stosunek pomiędzy napięciem wejściowym a napięciem wyjściowym układu. Napięciem wejściowym układu jest napięcie pakietu zasilającego, a napięciem wyjściowym jest napięcie podane na przetwornik analogowo-cyfrowy, tak jak zostało to przedstawione na rys. 5.3.



Rys. 5.5. Dzielnik napięcia układu pomiarowego poziomu napięcia pakietu zasilającego.

Napięcie na wyjściu dzielnika napięcia określone jest zależnością:

$$U_{Adc} = U_{Zas} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.1)$$

Zakładając maksymalną wartość napięcia pakietu, napięcie wejściowe na przetworniku analogowo-cyfrowym powinno wynosić 3.3V a rezystancja R_2 jest równa $10\text{k}\Omega$, to zgodnie z zależnością (5.1) rezystancja R_1 powinna przyjąć około $15\text{k}\Omega$.

Przetwornik analogowo-cyfrowy przetwarza sygnał analogowy na równoważną postać cyfrową. Mikrokontroler wyposażony jest w przetwornik 12-bitowy. Oznacza to, że do reprezentacji całego zakresu pomiarowego używa dwunastu bitów. Zakres pomiarowy określony jest przez sygnały referencyjne - 0V i 3.3V [22]. Wartość zwracana przez przetwornik dla napięcia 0V wynosi 0, natomiast dla napięcia 3.3V jest równa 4096. Rozdzielcość przetwornika wynosi około 0.8mV

Zgodnie z pkt. 4.2.7, zgłaszane są dwa stany alarmowe związane z zasilaniem:

- stan niskiego poziomu naładowania pakietu zasilającego wynoszący 6.8V,
- stan rozładowania pakietu zasilającego wynoszący 6V.

Biorąc pod uwagę powyższe zależności i założenia, można wyznaczyć wartości zwracane przez przetwornik dla stanów alarmowych, które przedstawiono w tabeli 5.5

Tabela 5.5. Poziomy napięć alarmowych oraz wartości zwracane przez przetwornik:

Napięcie U_{Zas} [V]	Napięcie U_{Adc} [V]	Wartość zwracana przez przetwornik
6.8	2.72	3376
6.0	2.4	2979

Pomiar poziomu napięcia dokonywany jest w trakcie zadania cyklicznego, wyzwalanego przez układ czasowo-licznikowy z częstotliwością 1Hz.

6. Eksperymenty

W niniejszym rozdziale przedstawiony został krótki opis środowiska testowego oraz przebieg testów układu do zmiany przełożeń.

6.1. Środowisko testowe

Wszystkie eksperymenty przeprowadzone zostały w sposób stacjonarny. Zamontowanie roweru na dedykowanym stojaku umożliwia swobodną symulację dowolnych scenariuszy testowych. Akwizycja danych sterownika układu jest w takim przypadku zdecydowanie mniej problematyczna, ponieważ nie jest konieczne stosowanie protokołów transmisji bezprzewodowej. Na potrzeby testów, autor wykonał aplikację, przedstawiającą kluczowe parametry układu w formie przebiegów czasowych. Program napisany został w języku C++, rozszerzonym o zestaw bibliotek Qt. Komunikacja pomiędzy sterownikiem a aplikacją nawiązana została za pomocą interfejsu szeregowego UART (ang. *Universal Asynchronous Receiver and Transmitter*). Sterownik pracujący w trybie testowania, wysyła zestaw danych do komputera PC z częstotliwością 20Hz. Zestaw danych, składa się z chwilowych wartości:

- kąta nachylenia podłoża,
- kadencji,
- prędkości liniowej roweru,
- wybranego biegu,
- stanu przycisku redukującego przełożenie,
- stanu przycisku zwiększającego przełożenie,
- trybu pracy sterownia.

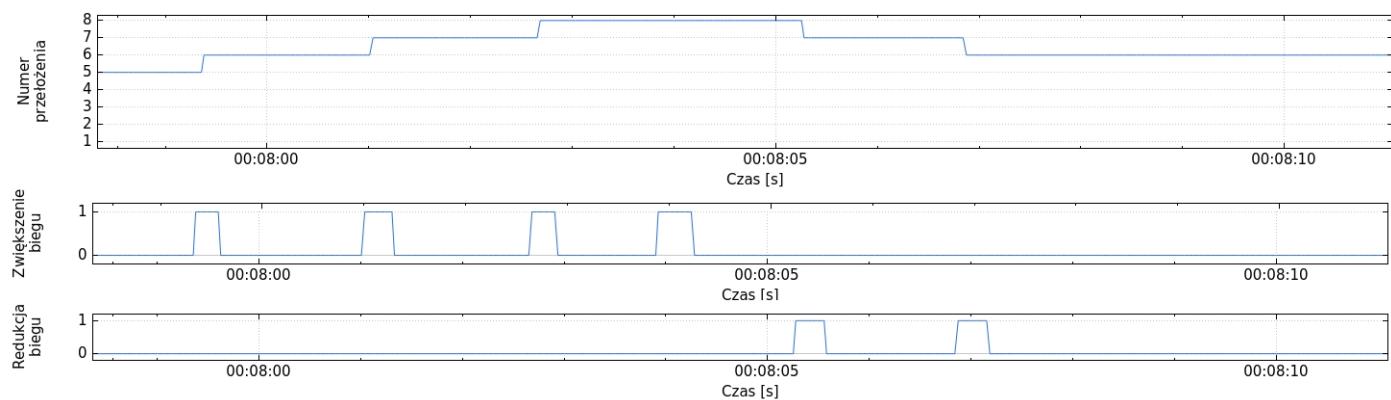
We wszystkich trybach automatycznych przedstawione są również przyjęte zakresy kadencji, a w trybie sportowym dodatkowo zakres kąta nachylenia podłoża.

6.2. Wyniki tesów

W niniejszym punkcie zaprezentowano wyniki testów wybranych scenariuszy, potwierdzające zgodność działania sterownika układu z założeniami, przedstawionymi w rozdziale czwartym.

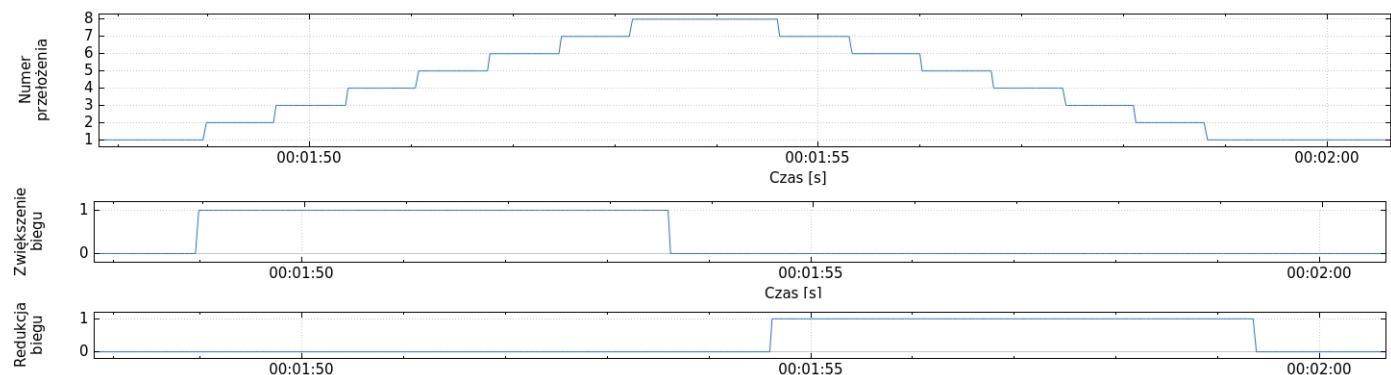
6.2.1. Tryb ręczny

Podstawowa funkcjonalność układu to zmiana przełożeń w trybie ręcznym, przedstawiona na rysunku 6.1:



Rys. 6.1. Zmiana przełożeń w trybie ręcznym.

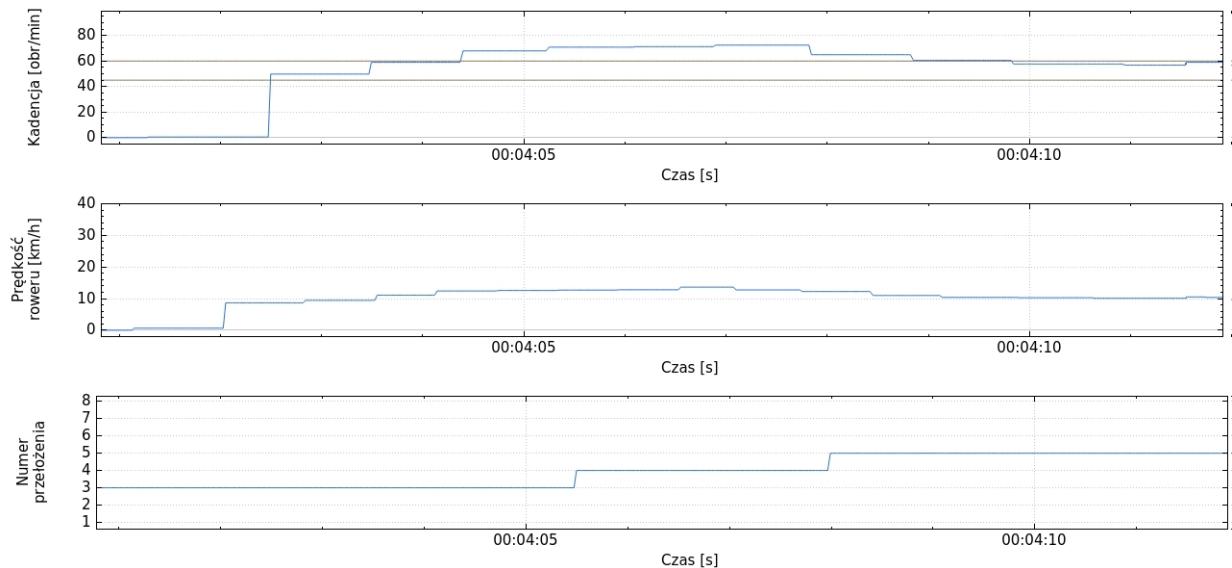
Na rysunku 6.2 przedstawiono eksperyment potwierdzający prawidłowe działanie ciągłej zmiany przełożeń. W drugiej sekundzie testu naciśnięto i przytrzymano przycisk zwiększenia przełożenia. W efekcie co około 0.7 sekundy następuje ciągłe zwiększenie biegu od 1 do 8. Identyczne zachowanie zaobserwowano przy próbie ciągłego zmniejszenia przełożenia.



Rys. 6.2. Ciągła zmiana przełożeń w trybie ręcznym.

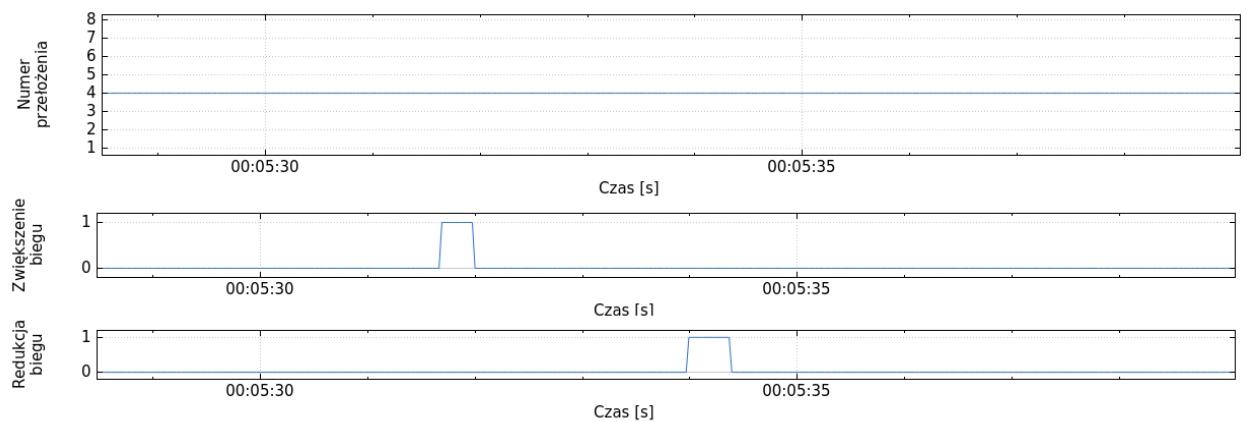
6.2.2. Tryb comfort

Pierwsza przetestowana funkcjonalność trybu comfort to utrzymywanie kadencji w zadanym zakresie, od 45 do 60 obrotów na minutę, który został oznaczony szarymi liniami. Zgodnie z przebiegami zamieszczonymi na rys. 6.3, można zaobserwować, że w wyniku przekroczenia górnej granicy wartości kadencji następuje automatyczna zmiana przełożenia. Stan przycisków do zmiany ręcznej nie zmienia się. Przełożenie zmieniane jest dwukrotnie. Kolejne zmiany przełożen nie są konieczne w wyniku stabilizacji wartości kadencji w zadanym zakresie.



Rys. 6.3. Automatyczna zmiana przełożień - tryb Comfort.

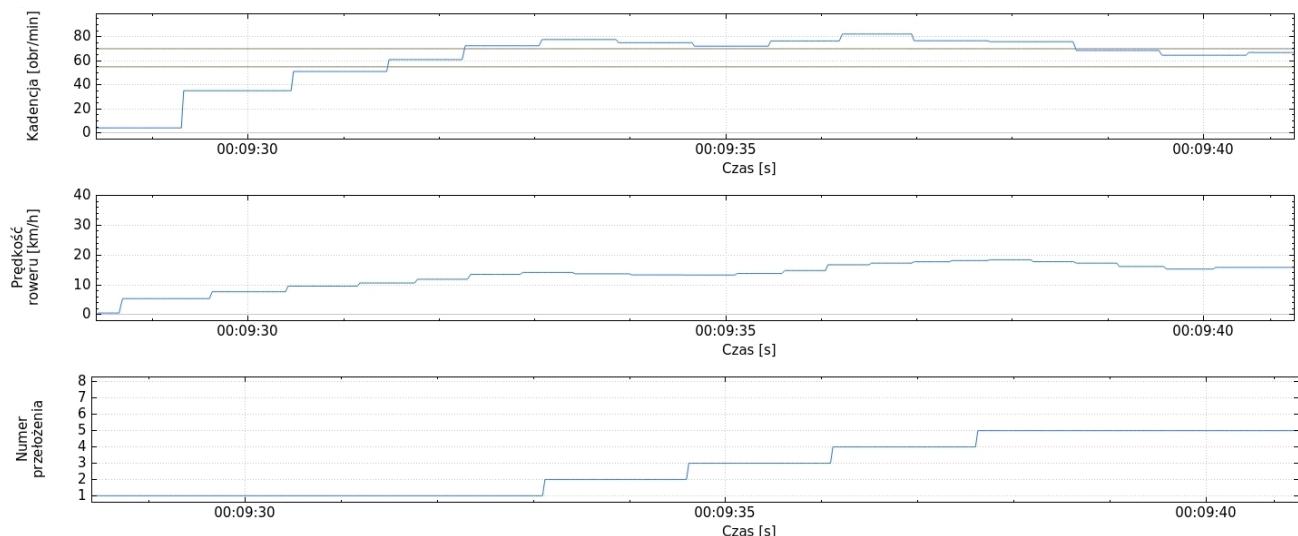
Drugi test przeprowadzony w trybie comfort obejmuje sprawdzenie wyłączenia możliwości ręcznej zmiany przełożień, który przedstawiono na rys. 6.4. Przełożenie jest stałe pomimo zarejestrowanych prób ręcznej zmiany biegu.



Rys. 6.4. Brak reakcji na ręczną zmianę w trybie Comfort.

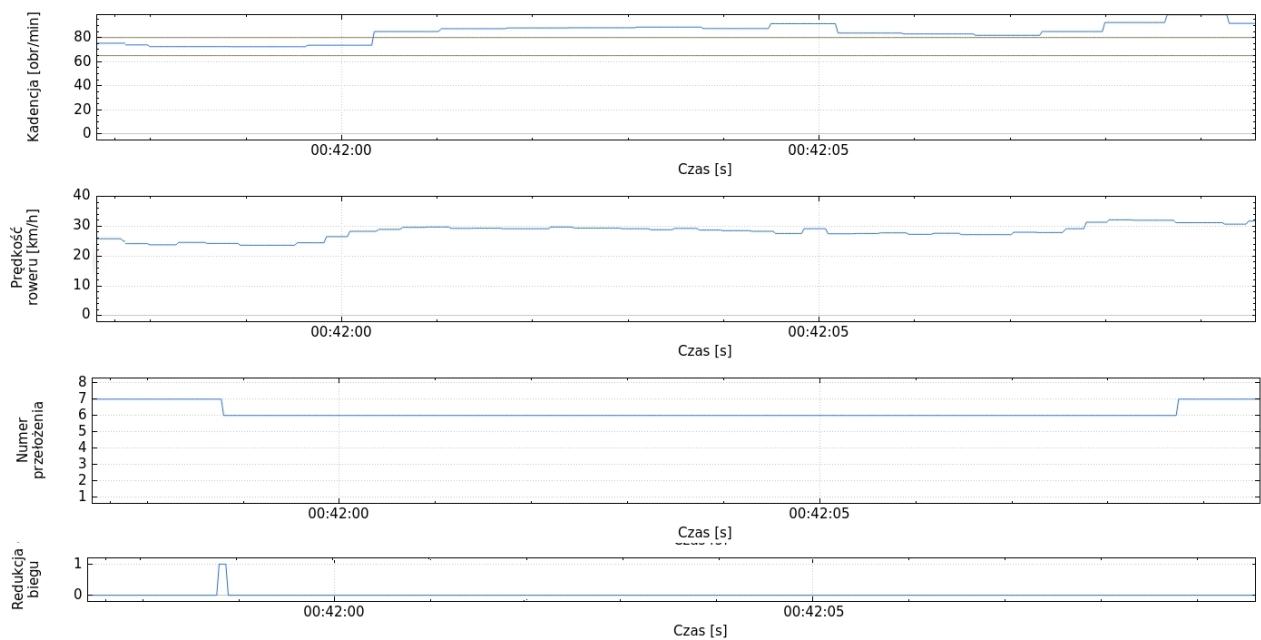
6.2.3. Tryb active

Tryb active powinien zapewniać utrzymanie kadencji w zadanym przedziale - od 55 do 70 obrotów na minutę. Zgodnie z rysunkiem 6.5, kadencja przekracza górną granicę zakresu począwszy od czwartej sekundy testu, aż przez kolejne 10 sekund. W wyniku przekroczenia zakresu zadanej kadencji, sterownik zwiększa przełożenie do momentu, w którym kadencja ustabilizuje się w zadanym przedziale. W tym przypadku bieg nr 5 pozwala na utrzymanie kadencji w zadany zakresie.



Rys. 6.5. Automatyczna zmiana przełożeń - tryb Active.

Kolejny eksperyment miał na celu sprawdzenie możliwości ręcznej zmiany przełożeń, w wyniku której, automatyczna zmiana biegów zostaje wyłączona na 10 sekund.



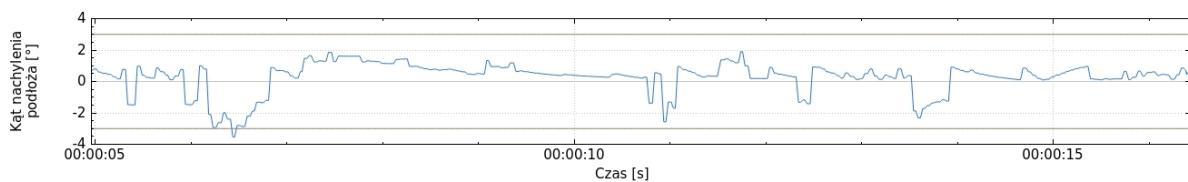
Rys. 6.6. Ręczna zmiana przełożeń - tryb Active.

Przebiegi, zaprezentowane na rys. 6.6, potwierdzają prawidłowe działanie sterownika. Ręczna zmiana biegu powoduje redukcję przełożenia. Pomimo przekroczenia górnej granicy zakresu kadencji, zmiana biegu następuje dopiero po 10 sekundach.

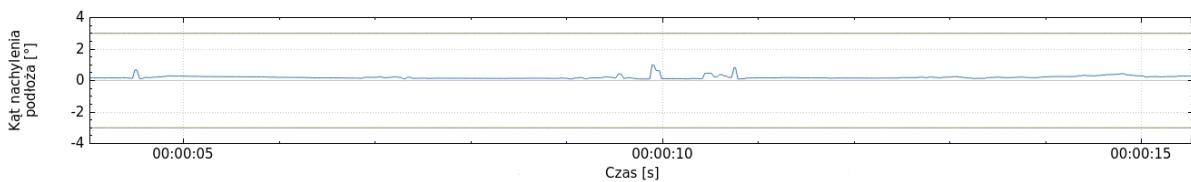
6.2.4. Tryb sport

W trybie sportowym wykonywany jest odczyt danych pomiarowych z akcelerometru i żyroskopu. Zastosowanie filtra komplementarnego, który dokonuje fuzji tych danych, umożliwia wyznaczenie kąta nachylenia podłożu (pkt.3.4.3). Działanie filtru można dopasować przez dobór wartości stałej czasowej. Niska wartość stałej czasowej pozwala zachować niewielkie przesunięcie fazowe pomiędzy rzeczywistą wartością kąta nachylenia a wartością estymowaną. Jednoczesnie wartość estymowana obarczona jest błędem wynikającym z dryfu żyroskopu. Wysoka wartość stałej czasowej pozwala usunąć błędy wartości estymowanej, jednak wprowadza dodatkowe opóźnienie. Dobór tego parametru jest zależny od aplikacji.

Kąt nachylenia podłożu, po którym porusza się rower, jest wielkością wolnozmieniąną, w porównaniu do np. kątów określających orientację wielowirnikowych platform latających. Niwelowanie błędu wynikającego z dryfu oraz przyspieszeń dynamicznych, działających na akcelerometr jest ważniejsze, niż szybka odpowiedź filtru. Dlatego stała czasowa powinna przyjąć wysoką wartość. Przebiegi przedstawione na rys. 6.7 oraz 6.8 przedstawiają przebieg estymowanej wartości kąta nachylenia podłożu dla przypadków, w których stała czasowa wynosi odpowiednio 0.5 i 2 sekundy, a wartość kąta nachylenia nie ulega zmianie:



Rys. 6.7. Przebieg estymowanej wartości niezmieniającego się kąta nachylenia dla stałej czasowej równej 0.5 sekundy.

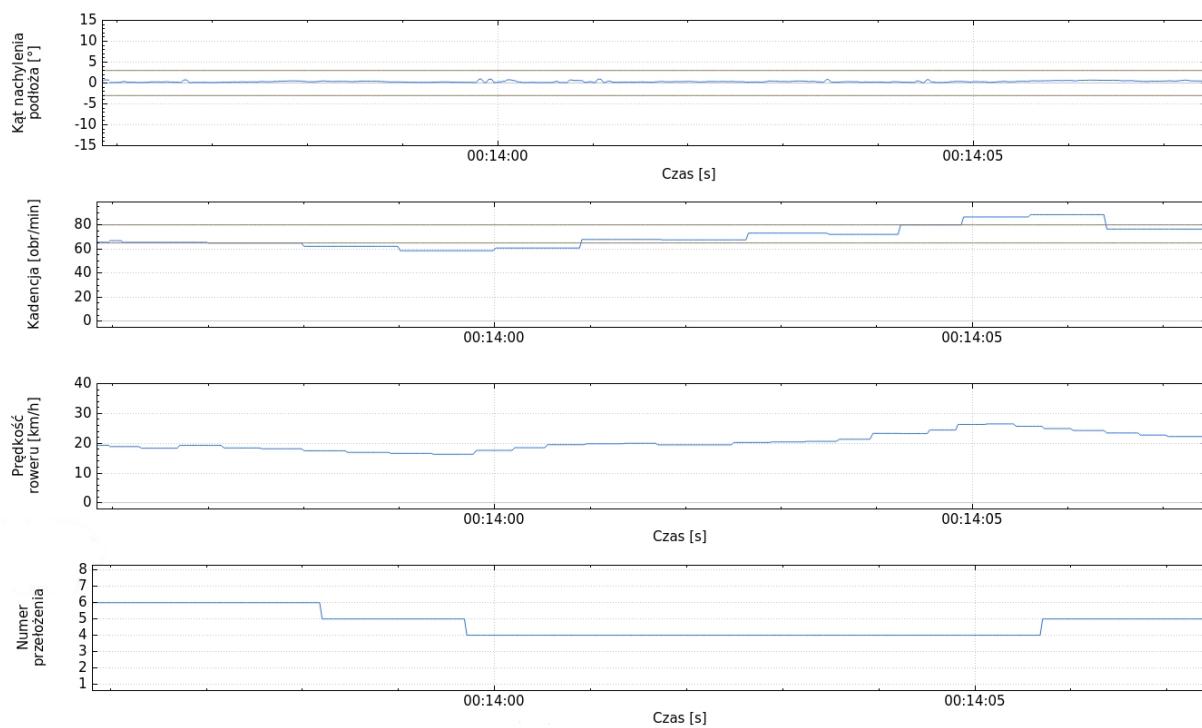


Rys. 6.8. Przebieg estymowanej wartości niezmieniającego się kąta nachylenia dla stałej czasowej równej 2 sekundy.

Stała czasowa ustalona na poziomie 0.5 sekundy jest zdecydowanie za mała. Zaobserwowano znaczące błędy estymacji, spowodowane przyspieszeniami działającymi na jednostkę pomiarową, które są efektem niewielkich ruchów roweru w trakcie przeprowadzania eksperymentu. Estymowana wartość kąta nachylenia przekroczyła, w drugiej sekundzie testu, granicę trzech stopni. Taki sposób działania

filtru komplementarnego w skuteczny sposób zakłoca pracę sterownika, ponieważ zakres oczekiwanej kadencji zmienia się pomimo braku zmian wartości kąta nachylenia. Zwiększenie stałej czasowej do 2 sekund powoduje znaczącą poprawę działania filtru. Obserwowane są minimalne odchylenia estymowanej wartości kąta nachylenia. Można przeprowadzić bardziej wyczerpującą analizę problemu doboru stałej czasowej, która prowadzi do wyznaczenia wartości optymalnej, z punktu widzenia przyjętych wskaźników jakości. Jednak wymaga ona precyzyjnego mechanizmu umożliwiającego pomiar rzeczywistych wartości kątów określających orientację układu pomiarowego. Autor uznał, że osiągnięta precyzja jest w pełni wystarczająca do poprawnego działania kontrolera.

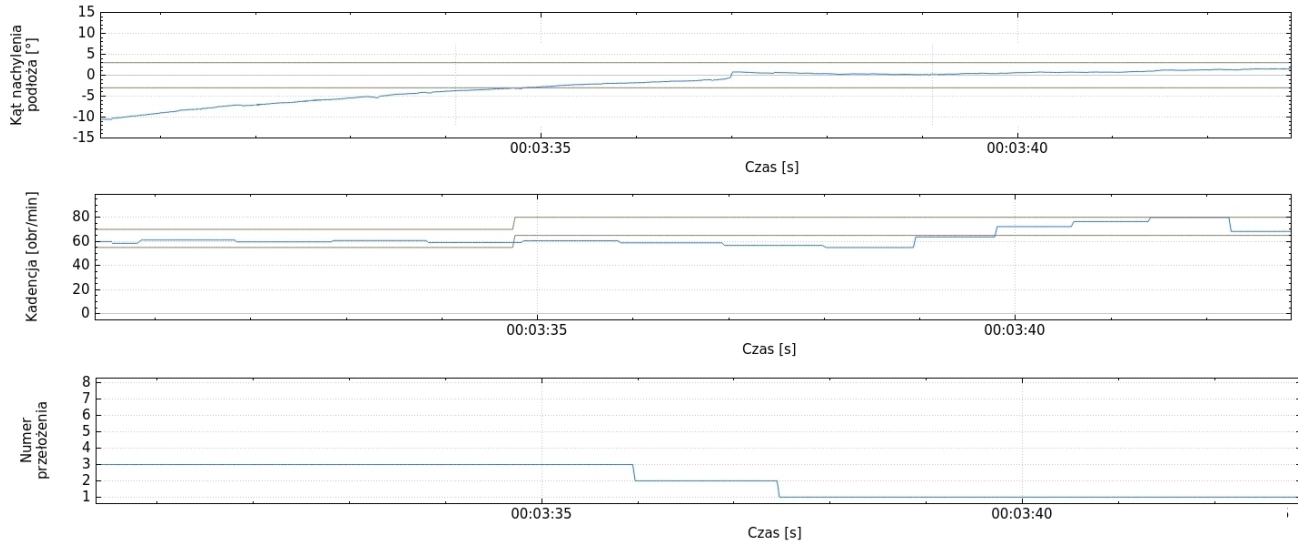
W trybie sport zakres zadanej kadencji jest zależny od wartości kąta nachylenia podłożu - tj. od 65 do 80 obrotów na minutę, jeśli wartość bezwzględna kąta nachylania jest mniejsza bądź równa 3° , oraz od 55 do 70 obrotów na minutę w pozostałych przypadkach. Przebiegi przedstawione na rys. 6.9 i 6.10 potwierdzają poprawne działanie kontrolera. Pierwszy przebieg zarejestrowano dla stałej wartości kąta



Rys. 6.9. Automatyczna zmiana przełożień - tryb Sport

nachylenia. Można zauważyć, że przełożenie zmieniane jest, gdy aktualna wartość kadencji jest poza zakresem 65-80 obrotów na minutę.

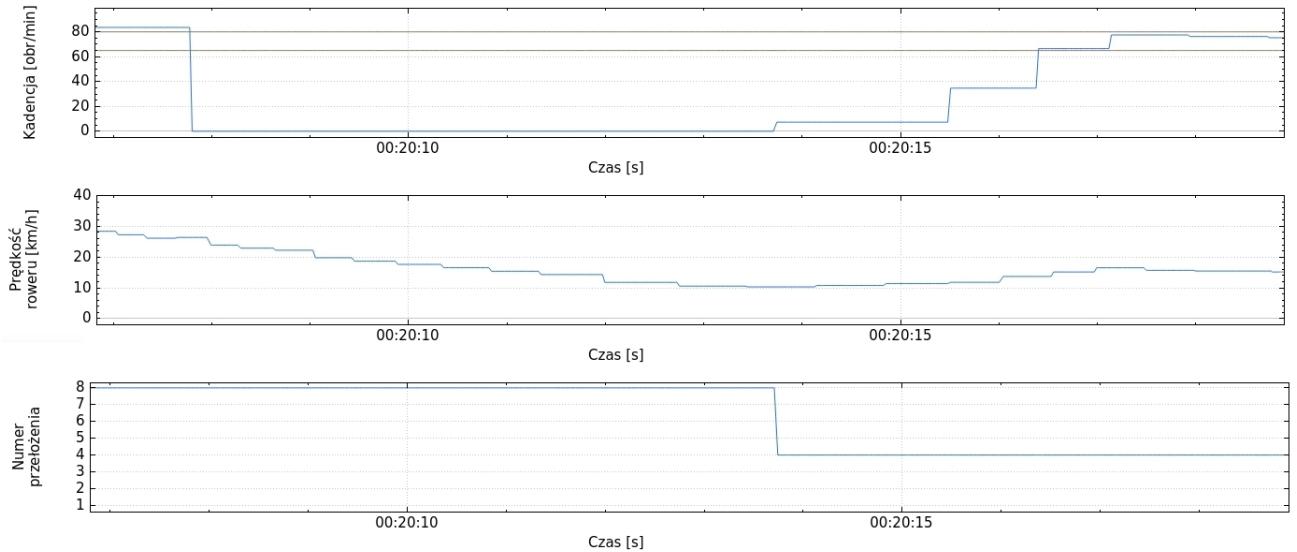
Drugi przebieg przedstawia symulację zjazdu roweru ze zbocza o znacznym nachyleniu. Jednostka pomiarowa IMU została zamontowana w taki sposób, aby umożliwić jej obrót wokół osi Z . Dzięki temu możliwa jest symulacja zmiany kąta nachylenia podłożu w przypadku, gdy rower zamontowany jest na stanowisku testowym. Także w tym przypadku kontroler działa zgodnie z założeniami. Początkowo wartość kąta nachylenia wynosi około -10° . Kadencja utrzymana jest w niższym zakresie obrotów. Kąt nachylenia zaczyna rosnąć. W momencie, w którym jego wartość jest większa niż -3° , następuje zmiana



Rys. 6.10. Zmiana zakresu zadanej kadencji wraz ze zmieniającą się wartościąkąt nabylenia podłoża.

zakresu zadanej kadencji, której aktualna wartość jest niższa od oczekiwanej. W wyniku uruchomienia zadania cyklicznego dla trybu sport następuje redukcja przełożenia.

Ostatnia z testowanych funkcjonalności to dobór przełożenia, zależny od prędkości roweru, po wznowieniu pedałowania. Ta funkcjonalność działa w takim sam sposób w trybie active oraz sport.



Rys. 6.11. Dopasowanie przełożenia w wyniku zatrzymania pedałowania - tryb Sport.

Przebiegi, zamieszczone na rys. 6.11, przedstawiają działanie kontrolera w sytuacji, gdy następuje wznowienie pedałowania po przerwie trwającej dłużej niż 2 sekundy. W wyniku tej przerwy wartość kadencji jest ustawiana na 0. Biegi nie są zmieniane aż do pierwszego zwarcia czujnika magnetycznego. Oznacza to wznowienie pedałowania, a co za tym idzie możliwość zmiany przełożień. Prędkość roweru w tym momencie wynosi $10 \frac{km}{h}$. Zgodnie z tabelą 4.1, kontroler ustawia bieg nr 4. W trakcie

prac nad tą funkcjonalnością okazało się, że po wznowieniu pedałowania może dochodzić do dwóch zmian przełożenia w niewielkim odstępie czasu. Przyczyną tego problemu jest dopasowanie przełożenia do prędkości, które może nastąpić w dowolnym momencie, oraz cykliczne zadanie trybu sport. Aby tego uniknąć, pierwsze działanie zadania cyklicznego po wznowieniu pedałowania jest pomijane. Takie zachowanie jest widoczne na rys. 6.11. Zadanie cykliczne uruchamiane jest co 2.5 sekundy. Po wznowieniu pedałowania kadencja utrzymywana jest poniżej zadanej wartości przez dłuższy czas - około 3 sekundy. Zatem w tym czasie na pewno uruchomione zostało zadanie cykliczne. W celu wyeliminowania zmian przełożień częstszych, niż 2.5 sekundy, pierwszy cykl został pominięty i nie doszło, w tym przypadku, do redukcji przełożenia.

7. Podsumowanie oraz plany rozwoju projektu

W ramach realizacji projektu powstał w pełni funkcjonalny, elektroniczny układ do zmiany przełożeń w rowerze. Układ, zgodnie z założeniami, oferuje dwa tryby pracy - ręczny oraz automatyczny. W ramach trybu automatycznego istnieje możliwość profilowania charakterystyki zmiany przełożeń.

Zdjęcia głównych elementów układu znajdują się w rozdziale Dodatek A. Jazdy testowe, które obejmowały odcinki o zróżnicowanej nawierzchni oraz topografii terenu, potwierdziły skuteczność działania oraz niezawodność wykonanego układu. Jedynym problemem, który ujawnił się w trakcie testów, okazały się przyciski do zmiany przełożeń. Jeśli kciuk użytkownika, po zmianie przełożenia, pozostanie w okolicach przycisków, może dojść do mimowolnych zmian przełożeń. Wynika to z faktu, iż w trudnym terenie, rower narażony jest na duże drgania, a przyciski zwierane się w wyniku bardzo krótkiego skoku nasadki przycisku. W efekcie może dojść do przypadkowego kontaktu nasadki przycisku oraz kciuka użytkownika, co prowadzi do przypadkowych zmian przełożenia. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie filtra RC o znacznie dłuższej stałej czasowej. Jednak to rozwiązanie wprowadza zdecydowane opóźnienie pomiędzy naciśnięciem przycisku a zmianą przełożenia, co według Autora pracy jest zjawiskiem niekorzystnym. Zdecydowanie lepszym pomysłem jest opracowanie systemu podobnego do konwencjonalnej manetki rowerowej, w którym przyciski aktywowane są poprzez mechanizm dźwigni o odpowiednio długim skoku. Jest to jeden z elementów projektu, który będzie rozwijany w przyszłości i polega na opracowaniu odpowiedniego układu mechanicznego.

Opracowany prototyp został zbudowany w oparciu o zestaw uruchomieniowy, zewnętrzny regulator napięcia oraz dedykowanych filtrów RC, wykonanych na płytce uniwersalnej ze standardowym rastrem 2.54mm. Takie rozwiązanie zdecydowanie ułatwiło prace nad projektem, jednocześnie sprawiając, że rozmiar sterownika układu jest zdecydowanie za duży. Dlatego plany rozwoju projektu obejmują również opracowanie dedykowanego obwodu elektronicznego. Dedykowany obwód pozwoli w znaczący sposób zmniejszyć rozmiary sterownika poprzez usunięcie nieużywanych wyprowadzeń portów I/O, interfejsu ICDI oraz połączeń przewodowych.

W trakcie realizacji, Autor znalazł kilka ciekawych prac traktujących o optymalnym doborze kadencji, np. [25], [26]. W pracy [25], jej Autor stara się opracować model optymalnej kadencji na podstawie takich danych, jak pomiar tężna, kadencji i mocy. Taki kierunek rozwoju układu do automatycznej zmiany przełożeń wydaje się być kierunkiem przyszłościowym. Obecnie kolarstwo zawodowe, zwłaszcza odmiana szosowa, stoi na bardzo wysokim poziomie. Wszystkie elementy składowe wyczynu sportowego, w tym także sprzęt kolarski, ma ogromne znaczenie w odniesieniu sukcesu. Producenci sprzętu

opracowują innowacyjne rozwiązania, aby jak najbardziej wspomóc zawodników. System doboru automatycznej zmiany przełożeń, wykorzystujący zaawansowane modele fizjologiczne zachowania organizmu w trakcie wyczyny sportowego, może być bardziej efektywny, niż ręczny dobór przełożeń. Minimalna przewaga, w wyniku zastosowania takiego układu napędowego, może okazać się kluczowa w walce o pierwsze miejsca największych wyścigów kolarskich.

8. Dodatek A

Zbiorcze podsumowanie szczegółów implementacji:

Tabela 8.1. Porty wejściowe mikrokontrolera

Port wejściowy GPIO	Funkcja
GPIO_A2	Obsługa czujnika magnetycznego do pomiaru prędkości kątowej koła roweru.
GPIO_A3	Obsługa czujnika magnetycznego do pomiaru kadencji.
GPIO_B6	Obsługa przycisku zwiększającego przełożenie.
GPIO_B7	Obsługa przycisku redukującego przełożenie.
GPIO_C4	Obsługa przycisku zmiany trybu jazdy.

Tabela 8.2. Porty wyjściowe mikrokontrolera

Port wyjściowy GPIO	Funkcja
GPIO_D0	Obsługa linii zegarowej magistrali I2C
GPIO_D1	Obsługa linii danych magistrali I2C
GPIO_E2	Generowanie sygnału sterującego pozycją serwomechanizmu
GPIO_F1	Wskaźnik RGB - kolor czerwony
GPIO_F2	Wskaźnik RGB - kolor zielony
GPIO_F3	Wskaźnik RGB - kolor niebieski

Tabela 8.3. Układy czasowo-licznikowe mikrokontrolera

Układ czasowo-licznikowy	Zadanie cykliczne	Częstotliwość zadania [Hz]
TIMER_0A	Odczyt danych z jednostki pomiarowej IMU	5
TIMER_0B	Czas trwania pozycji pomocniczych	nd.
TIMER_1A	Pomiar prędkości obrotowej koła	1000
TIMER_1B	Pomiar kadencji	1000
TIMER_2A	Generowanie sygnału sterującego pozycją serwomechanizmu	20 000
TIMER_3A	Ciągła zmiana przełożeń	1000
TIMER_3B	Tryb comfort	0.33
TIMER_4A	Wskaźnik RGB tryb migający	2
TIMER_4B	Pomiar stanu pakietu zasilającego	1
TIMER_5A	Tryb active i sport	0.5

Tabela 8.4. Parametry filtrów RC

Przeznaczenie filtru RC	Rezystancja R [$k\Omega$]	Pojemność C [μF]	Stała czasowa [ms]
Przyciski	200	470	94
Czujnik magnetyczny koła	100	100	10
Czujnik magnetyczny mechanizmu korbowego	100	100	10
Filtr komplementarny	-	-	2000

9. Dodatek B

Niniejszy dodatek zawiera zdjęcia elementów wykonanych w trakcie realizacji projektu.



Rys. 9.1. Przerzutka SRAM X5 wraz z zamontowanym serwomechanizmem.



(a) Przerzutka w pozycji biegu nr 1



(b) Przerzutka w pozycji biegu nr 8

Rys. 9.2. Pozycja przerzutki dla skrajnych przełożeń



(a) Czujnik prędkości roweru



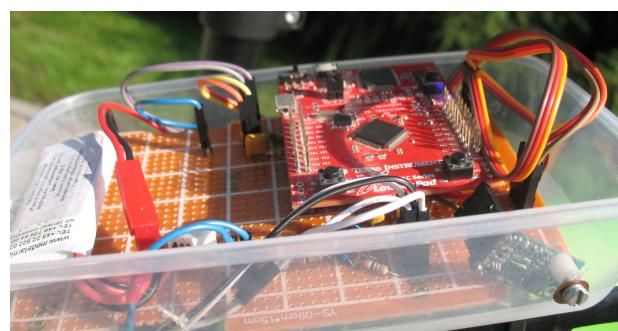
(b) Czujnik kadencji

Rys. 9.3. Czujniki magnetyczne

(a) Przycisk redukujący bieg



(b) Przycisk zwiększający bieg

Rys. 9.4. Manetka do zmiany przełożeń**Rys. 9.5.** Sterownik układu

10. Bibliografia

- [1] Shimano Company. *Company History*. <http://www.shimano.com/content/Corporate/english/index/portal-site/history1.html/>.
- [2] BikeWorld.pl. *SRAM RED ETAP*. http://portal.bikeworld.pl/artykul/testy_i_nowosci/nowosci_sprzetowe/14547/sram_red_etap. 2015.
- [3] Andrzej Rutkowski. *Części Maszyn*. str. 250-252. Warszawa: Wydawnictwo WSiP, 1986.
- [4] Marek Olsza. *Projektowanie i dobieranie zespołów maszyn*. str. 8. Radom: Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy, 2005.
- [5] shimano.com. *Shimano DURA-ACE R9100 Road Components*. <http://bike.shimano.com/content/sac-bike/en/home/news-and-info/news/shimano-introduces-new-dura-ace-r9100-road-components--integrate.html>. 2016.
- [6] thebikelane.com. *A Guide to Road Groupset Weights*. <http://www.thebikelane.com.au/2015/06/2015-road-groupset-weights/>. 2015.
- [7] FSA. *FSA K-Force WE Drivetrain groupset*. we-fsa.com. 2016.
- [8] enduro mtb.com. *SRAM Eagle 12-speed Drivetrain announced*. <http://enduro-mtb.com/en/sram-eagle-12-speed-drivetrain-announced-weights-prices-facts/>. 2016.
- [9] bikeRadar. *Shimano XTR Di2 M9050 transmission review*. <http://www.bikeradar.com/mtb/gear/category/components/groupsets/groupset-mountain/product/review-shimano-xtr-di2-m9050-49849/>. 2016.
- [10] KROSS. *KROSS Level B+ equiped with SRAM XX1 Eagle*. <http://www.kross.pl/en/news-list/let's-go-rio-kross-level-b-going-brazil>.
- [11] Witold Byrstki. *Obserwacja i sterowanie w systemach dynamicznych*. str. 199. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2007.
- [12] Piotr Grabowski. *Zbiór zadań z teorii sterowania - Zagadnienie realizacji number*.
- [13] Max Kamenetsky. *First order lowpass filter - źródło grafiki*. https://web.stanford.edu/~boyd/ee102/conv_demo.pdf.
- [14] Stmicroelectronics. *MEMS and Sensors - Smart Motion tracking, IoT and enhanced user experience*. Promotional Material. 2016.

- [15] StMicroelectronics. *Everything about STMicroelectronics' 3-axis digital MEMS gyroscopes*. StMicroelectronics. 2010.
- [16] Katherine A. Lilienkamp. *Lab Experiences for Teaching Undergraduate Dynamics*. str. 297-303. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Mechanical Engineering, 2003.
- [17] Wojciech Grega. *Metody i algorytmy sterowania cyfrowego w układach scentralizowanych i rozproszonych*. str. 73. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2004.
- [18] Allen Hunter, Stephen S. Cheung. *Cutting-Edge Cycling Advanced training for advanced cyclists*. str. 190. Human Kinetics, 2012.
- [19] Chris R. Abbiss, Paul Larsen, Jeremiah Peiffer. „Optimal cadence selection during cycling”. W: *INTERNATIONAL SPORTMED JOURNAL* (2009).
- [20] Stephen Prata. *Szkoła programowania Język C*. str. 23. Gliwice: Helion S.A., 2006.
- [21] SRAM. *X5 Rear Derailleur*. <https://www.sram.com/sram/mountain/products/x5-rear-derailleur>.
- [22] Texas Instruments. *Tiva TM TM4C123GH6PM Microcontroller - Data Sheet*. Texas Instruments. 2014.
- [23] Pololu RoboticsElectronics. *Pololu Altimu10 - webpage specification*. Pololu RoboticsElectronics.
- [24] Texas Instruments. *Getting Started with the Tiva TM4C123G LaunchPad Workshop*. Texas Instruments. 2013.
- [25] Robert Reed. *PhD Thesis - A mathematical model to determine optimum cadence for an individual cyclist using power output, heart rate and cadence data collected in the field*. Salford: Universtity of Salford, 2013.
- [26] Iain Crouch. *Optimal gear selection on an automatic bicycle*. Oxford University.