



AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

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

KATEDRA AUTOMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

Praca dyplomowa magisterska

*Dobór algorytmów regulacji oraz samostrojenia dla sterownika PLC
współpracującego z nieliniowym obiektem mechatronicznym*

*Synthesis of control and self tuning algorithms for a PLC controlling
a nonlinear mechatronic ball and beam plant*

Autor:

inż. Piotr Banaszkiewicz

Kierunek studiów:

Automatyka i Robotyka

Opiekun pracy:

dr inż. Andrzej Tutaj

Kraków, 2017

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

Serdecznie dziękuję opiekunowi pracy, Panu Doktorowi Andrzejowi Tutajowi, za niesioną pomoc i zawsze dobrą radę.

Spis treści

1. Wstęp	7
2. Obiekt regulacji	9
2.1. Obiekty typu kulka na belce	9
2.2. Projekt mechaniczny	10
2.3. Konstrukcja mechaniczna	11
2.4. Przeniesienie napędu	11
2.5. Belka	12
2.6. Kulka	13
2.7. Podsumowanie	13
3. Układ sterowania i instrumentacji	15
3.1. Sterownik PLC	15
3.2. Silnik z reduktorem i enkoderem	16
3.3. Czujniki odległości	19
3.4. Czujnik bazowania	21
3.5. Systemy napięć	22
3.6. Okablowanie i zabezpieczenia	22
3.7. Podsumowanie	23
4. Model symulacyjny	25
5. Model matematyczny	27
6. Identyfikacja	29
7. Algorytmy sterowania	31
8. Algorytmy samostrojenia	33
9. Symulacje i eksperymenty	35
10. Wnioski	37
A. Warianty zespołu napędowego	39
B. Alternatywne czujniki pozycji kulki	41

1. Wstęp

Lorem ipsum.

2. Obiekt regulacji

Obiektem poddawany regulacji był system typu kulka na belce, który został zbudowany od podstaw na potrzeby tej pracy.


2.1. Obiekty typu kulka na belce

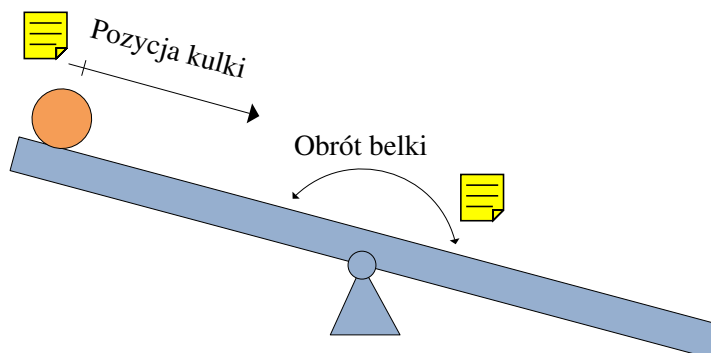
Na system tego typu składają się długa, umieszczona horyzontalnie belka, łożyskowana w sposób umożliwiający zmianę kąta nachylenia, i silnik lub serwomechanizm, który umożliwia wychylanie belki. Po belce swobodnie toczy się kulka.


Podstawowym zadaniem regulacji w systemie tego typu jest stabilizacja położenia kulki w wybranym punkcie. Charakterystyczną cechą tego systemu jest prostota konstrukcji oraz niestabilność przy braku aktywnej regulacji.

Obiekty tego typu są często wykorzystywane w dydaktyce teorii sterowania. Składają się na to poniższe powody:

- prostota budowy,
- możliwość zastosowania różnych czujników położenia kulki,
- możliwość zastosowania różnych silników i mechanizmów przeniesienia napędu,
- możliwość zastosowania różnych struktur i algorytmów sterowania.

Uproszczony schemat systemu kulka i belka przedstawiony został na  ze 2.1:



 g. 2.1. Uproszczony schemat systemu typu kulka i belka.

Prostota konstrukcji i inherentna niestabilność sprawiły, że powstało wiele implementacji tego systemu (np. [1][2][3]), również komercyjne, jak na przykład produkt firmy Quanser (fig. 2.2):



Fig. 2.2. Zdjęcie produktu *Ball and Beam* firmy Quanser. Źródło: http://www.quanser.com/Products/ball_beam.

2.2. Projekt mechaniczny

Przed przystąpieniem do budowy obiektu, zaprojektowano wstępny kształt w programie SketchUp Make (fig. 2.3). Wyszczególniono na nim:

- prostokątną podstawę,
- słupy podtrzymujące belkę,
- usztywniający łącznik między słupami,
- oś obrotu (wał) umieszczony w połowie długości belki,
- przekrój belki.

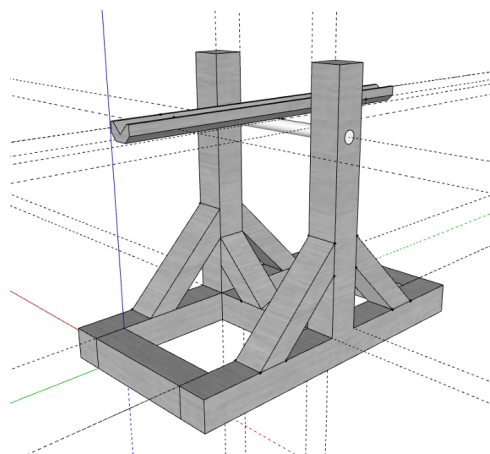


Fig. 2.3. Render projektu CAD.

Ostateczna konstrukcja różni się względem projektu CAD o wysokość słupów, i umiejscowienie łącznika między nimi. Dodatkowo zastosowano sztywne połączenie osi obrotu belki i samej belki wykorzystujące podpory wału.

2.3. Konstrukcja mechaniczna

Większość konstrukcji powstała z ocynkowanych elementów stalowych, tzw. ceowników w przekroju kwadratowym o boku długości 4 cm, pozwalających na łatwe łączenie kilku elementów przy pomocy śrub. Rozwiązanie to jest bardzo tanie w porównaniu do przemysłowych profili aluminiowych lub spawanych profili stalowych, ale jednocześnie jest dość ciężkie i poprzez niedomknięcie profilu podatne na pewne momenty gnące.

Kąty proste pomiędzy elementami ustawionymi prostopadle zostały zapewnione poprzez zastosowanie kątowych wsporników stalowych.

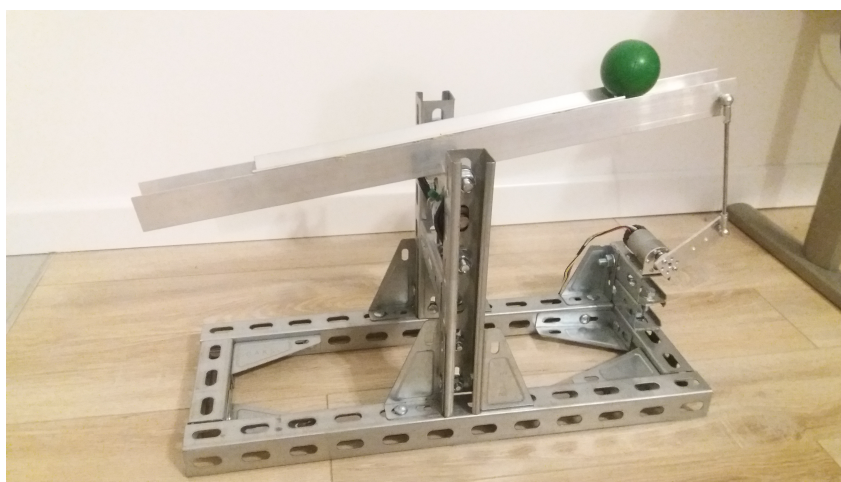


Fig. 2.4. Zdjęcie obiektu regulacji w trakcie budowy.

Na prostokątnej podstawie o wymiarach zewnętrznych 60 cm × 23 cm wykonanej z ceowników ustawiono pionowo na środkach dłuższych boków słupy nośne, również wykonane z ceowników. Słupy zostały usztywnione poprzez połączenie ich przęsłem podniesionym o 11 cm względem podstawy.

Na słupach przyczepiono współosiowo łożyska maszynowe samonastawne typu UCFL 201 w obudowach odlewanych. Przez łożyska poprowadzono pręt nierdzewny stalowy o średnicy 12 mm; na pręt nałożono podpory wałka w kształcie litery T, a do nich przykręcono belkę.

Silnik elektryczny, przymocowany do aluminiowego uchwyty, został umieszczony podłużnie na krótszym boku podstawy, na podwyższeniu wykonanym z dwóch elementów stalowych typu ceownik.

2.4. Przeniesienie napędu

W obiekcie zastosowano przeniesienie napędu wykorzystujące mechanizm korbowy. Rozwiązanie to posiada kilka zalet:

- gwarantuje bezpieczeństwo mechanizmu – błąd algorytmiczny (np. przypadkowe podanie maksymalnego sterowania) nie spowoduje uszkodzenia fizycznego żadnej części obiektu,

- poprzez oddalenie punktu zaczepu korbowodu od osi obrotu belki zmniejsza wymagania dotyczące mocy silnika, a tym samym jego cenę,
- pozwala regulować zakres wychyleń belki w wyniku zmiany długości korby.

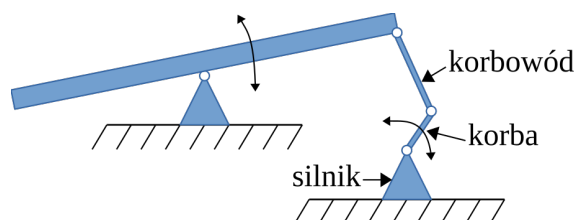


Fig. 2.5. Schemat napędu opartego o mechanizm korbowy.

Parametry fizyczne mechanizmu korbowego:

- długość korby: 3 cm,
- długość korbowodu: 16 cm,
- zastosowane przeguby kulowe między korbą i korbowodem oraz korbowodem i belką,
- użyty silnik prądu stałego, komutatorowy, z magnesami trwałymi, sprzężony z zębatą przekładnią redukcyjną (więcej w rozdziale 3.2).

2.5. Belka

Belka została stworzona poprzez trwałe sklejenie krawędzi kątownika aluminiowego o długości 40 cm i boku 3 cm oraz krawędzi ceownika aluminiowego o długości 65 cm i boku 4 cm. W przekroju przypomina to kształtem literę M domkniętą od spodu (fig. 2.6).

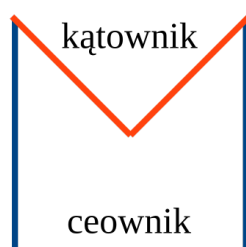


Fig. 2.6. Schemat przekroju belki z zaznaczonymi ceownikiem aluminiowym i kątownikiem aluminiowym.

Użyty kątownik jest nieco krótszy od ceownika. Zamocowano go symetrycznie, a w odległościach około 1 cm od jego końców zamontowano uchwyty (fig. 2.7) na czujniki optyczne (zob. rozdział 3.3).

Uchwyty pozwalają na zmianę wysokości czujnika względem płaszczyzny belki, a także na pochylenie go w osi prostopadłej do płaszczyzny belki.

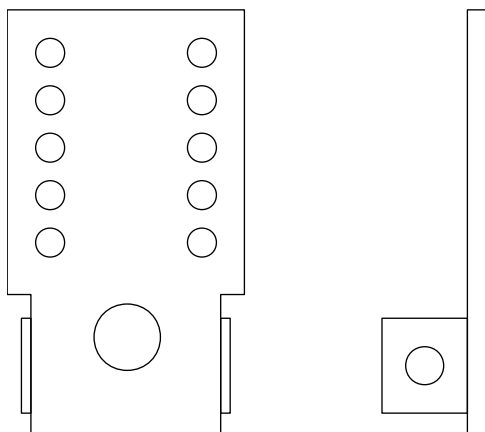


Fig. 2.7. Schemat uchwyty na czujnik odległości w rzucie od przodu i z boku. Zastosowanie mocowania na śrubie pozwala pochylać czujnik względem belki.

2.6. Kulka

Do projektu dobrano lekką kulkę o masie 20 g wykonaną z miękkiej gąbki; średnica kulki wynosi 6 cm.



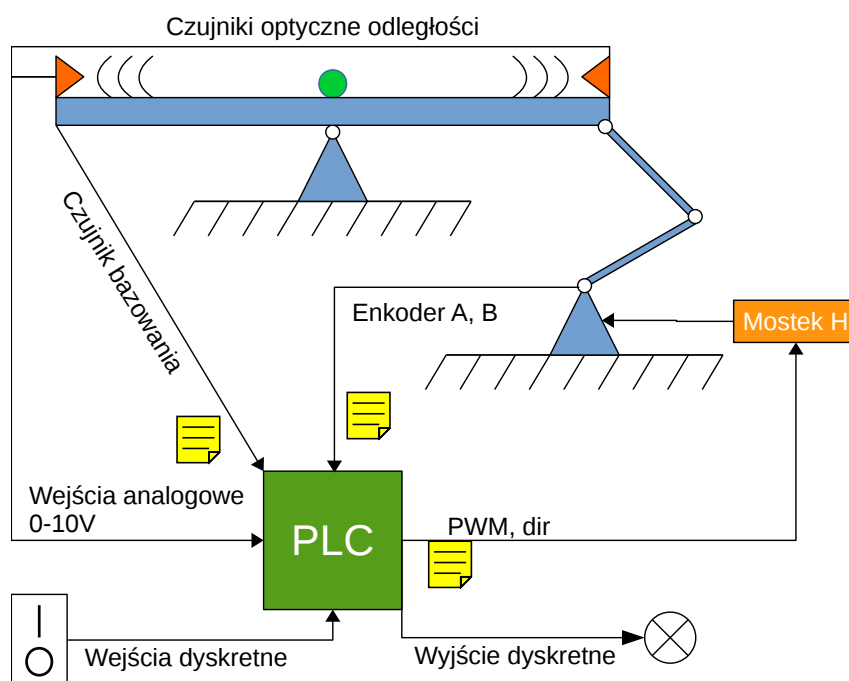
Fig. 2.8. Zdjęcie kulki.

2.7. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono obiekt regulacji, cel regulacji oraz przedstawiono podobne konstrukcje, w tym jedno rozwiązanie komercyjne. Następnie opisano dokładnie budowę obiektu regulacji, poczynając od konstrukcji podstawy, poprzez umocowanie osi obrotu belki, umieszczenie silnika, przeniesienie napędu, a na budowie belki i doborze kulki kończąc.

3. Układ sterowania i instrumentacji

Do odczytywania danych z obiektu i sterowania nim wykorzystano opisany w tym rozdziale układ sterowania i instrumentacji (rys. 3.1). W jego sercu znajduje się przemysłowy sterownik PLC, który odczytuje dane o położeniu kulki z dwóch czujników odległości oraz położenie kątowe wału silnika z enkodera. Dodatkowo do sterownika podłączony został czujnik bazowania oraz przyciski: START (NO), STOP (NC). Na wyjścia sterownika podłączony został mostek H kontrolujący silnik oraz dioda sygnalizacyjna.



rys. 3.1. Schemat układu sterowania i instrumentacji wraz z zaznaczonymi połączeniami.

3.1. Sterownik PLC


Wykorzystany w pracy sterownik PLC to Siemens S7-1211C DC/DC/DC. Działa on na napięciu stałym 24 V, posiada 6 wejść dyskretnych 24 V, 4 tranzystorowe wyjścia dyskretnie 24 V i 2 napięciowe wejścia analogowe 0 – 10 V.



W celu ułatwienia komunikacji między sterownikiem i elektroniką opartą o logikę 5 V (więcej w podrozdziale 3.5), został on rozszerzony o dodatkową płytkę sygnałową SB 1223 działającą na logice 5 V; dodaje ona po 2 wejścia i wyjścia dyskretne 5 V.

Podstawowe parametry sterownika oraz płytki sygnałowej zostały zebrane w tabeli 3.1:

Tabela 3.1. Podstawowe parametry sterownika PLC Siemens S7-1211C i płytki sygnałowej Siemens SB 1223^a.

Nazwa	Siemens S7-1211C	Siemens SB 1223
Napięcie zasilania	24 V DC	5 V DC
 Ilość wejść cyfrowych	6	2
Ilość wyjść cyfrowych	4	2
Ilość wejść analogowych	2	0
Ilość wyjść analogowych	0	0
Typ wejść cyfrowych	<i>sink-source</i>	<i>source</i>
Typ wyjść cyfrowych	półprzewodnikowe MOSFET <i>source</i>	półprzewodnikowe MOSFET <i>sink-source</i>
Typ wejść analogowych	Napięciowe 0 – 10 V	n.d.
Szybkie liczniki	Do 6 z częstotliwością 100 kHz ^b	Do 2 z częstotliwością 200 kHz ^c
Wyjścia impulsowe	Do 4 z częstotliwością 100 kHz	Do 2 z częstotliwością 200 kHz
Pamięć robocza	30 kB	n.d.
Pamięć ładowania	1 MB	n.d.
Pamięć trwała	10 kB	n.d.
Czas wykonywania instrukcji boolowskich	0,08 μ s/instrukcję	n.d.
Czas wykonywania operacji na typie WORD	1,7 μ s/instrukcję	n.d.
Czas wykonywania operacji na typie REAL	2,3 μ s/instrukcję	n.d.


^a opracowanie własne na podstawie [4],


^b w trybie kwadraturowym wykorzystywane są dwa wejścia, a maksymalna częstotliwość wynosi 80 kHz,

^c w trybie kwadraturowym wykorzystywane są dwa wejścia, a maksymalna częstotliwość wynosi 160 kHz.

3.2. Silnik z reduktorem i enkoderem





Jak już zasygnalizowano w rozdziale 2.4, w pracy użyto  ka prądu stałego (komutatorowy, z magnesami trwałymi). Silnik sprzężony jest z zębatą przekładnią redukcijną o przełożeniu 18,75:1. Za

silnik n umieszczony jest enkoder inkrementalny kwadraturowy o 64 impulsach na obrót wału, co daje 1200 impulsów za przekładnią.

Wybrany silnik stanowi dobry kompromis między złożonością, wydajnością i ceną. Dyskusja na temat możliwości zastosowania innych typów napędów została przeprowadzona w dodatku A.



Producent silnika nie dostarcza pełnej dokumentacji, a jedynie kilka wybranych parametrów. Wy-musiło to analityczne lub eksperymentalne wyznaczenie pozostałych wymaganych do zamodelowania silnika parametrów. Wszystkie parametry zostały przedstawione w tabeli 3.2 poniżej.

Tabela 3.2. Parametry producenta silnika, enkodera i przekładni^a.

Parametr	Wartość
Średnica	37 mm
Długość	68 mm
Masa	215 g
Średnica wału	6 mm
Przełożenie przekładni	18,75:1
Napięcie znamionowe	12 V
Prędkość znamionowa	52,36 rad s ⁻¹
Prąd znamionowy 	300 mA
Prąd zatrzymania silnika	5000 mA
Moment zatrzymania silnika	0,59 N m
Typ enkodera	Kwadraturowy, inkrementalny, bez pamięci
 ć impulsów na obrót za przekładnią	1200 (tryb kwadraturowy)

^a opracowanie własne na podstawie [5].

Parametry niewymienione w tabeli 3.2, takie jak rezystancja silnika, stała silnika, moment bezwładności wału czy współczynniki tarcia suchego i wiskotycznego, nie zostały podane przez producenta, dlatego została przeprowadzona ich identyfikacja opisana w rozdziale 6.

Silnik sterowany jest przez PLC za pomocą układu a H (Pololu BD65496MUV). Został on dobrany tak, by spełniać wymagania elektryczne silnik pracy znamionowej. Sterowany jest sygnałem PWM o częstotliwości ~~przenoszenia~~ 20 kHz. Dodatkowym sygnałem jest binarny sygnał kierunku obrotu silnika. Najistotniejsze parametry wybranego mostka H przedstawiono w tabeli 3.3.




 Mostek H przylutowano do płytki uniwersalnej. Połączenia elektryczne zrealizowano za pomocą przylutowanych czterech podwójnych zy ARK (raster 2,54 mm). Zdjęcie modułu przedstawiono na ze 3.2, a opis złącz w tabeli 3.4.

Tabela 3.3. Najważniejsze parametry mostka H^a.

Parametr	Wartość
Napięcie pracy silnika	2 – 16 V
Maksymalny prąd ciągły silnika	1,2 A
Maksymalny prąd chwilowy silnika	5 A
Maksymalna częstotliwość PWM	500 kHz
Napięcie zasilania	2,5 – 5,5 V
Napięcie sygnałów logicznych	Napięcie zasilania $\pm 0,3$ V

^a opracowanie własne na podstawie [6].

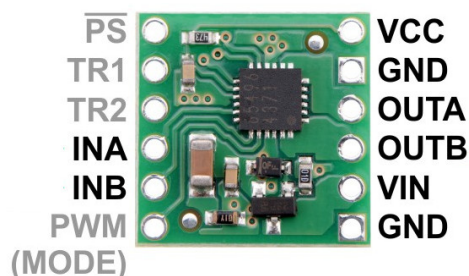


Fig. 3.2. Zdjęcie układu mostka H (Pololu BD65496MUV). Źródło: <https://www.pololu.com/product/2960>.

Tabela 3.4. Opis złącz mostka H^a.

Złącze	Opis
VCC	Zasilanie układu
VIN	Zasilanie silnika
GND	Masa
OUTA, OUTB	Wyjścia zasilania silnika
INA, INB	Wejścia sygnałów sterujących
PWM (MODE)	Przełączanie między trybem IN/IN a EN/IN ^b
PS	Oszczędzanie energii
TR1, TR2	Kontrola maksymalnej częstotliwości

^a opracowanie własne na podstawie [6].

^b układ umożliwia sterowanie silnikiem w trybie IN/IN oraz EN/IN; ten pierwszy przekazuje sygnał wysoki ze złącza INA na OUTA i INB na OUTB (za wyjątkiem sytuacji dwóch stanów wysokich), natomiast ten drugi pozwala użyć sygnału PWM (INA) oraz sygnału kierunku obrotu (INB).

W układzie nie zastosowano czujnika położenia wału, do którego przymocowana jest belka; zamiast tego wykorzystano zależność geometryczną pomiędzy obrotem wału silnika a obrotem belki. W przypadku niewielkich odchylen kąt belki θ powinien być liniowo związany z kątem obrotu wału silnika α w następujący sposób:

$$\theta = \frac{L}{d_r} \alpha \quad (3.1)$$

gdzie: L to odległość końca belki od osi obrotu, d_r to długość korby.

Niestety równanie (3.1) jest poprawne tylko w niewielkich odchyleniach belki od poziomu oraz gdy linia łącząca punkt zaczepu mechanizmu korbowego i oś obrotu belki jest równoległa do korby. Faktyczna zależność $\theta(\alpha)$ została zidentyfikowana za pomocą modelu symulacyjnego (rozdział 5).

3.3. Czujniki odległości

Do pomiaru położenia kulki wykorzystano parę analogowych czujników Sharp GP2Y0A41SK0F. Każdy z czujników składa się z nadajnika światła podczerwonego i odbiornika; obliczanie pozycji obiektu odbywa się na zasadzie triangulacji. Podstawowe parametry czujników opisano w tabeli 3.5.

Czujniki optyczne pracujące w podczerwieni nie są jedynymi sensorami, które można zastosować do badania położenia kulki w układach typu kulka i belka. Alternatywne sposoby zostały omówione w dodatku B.

Tabela 3.5. Podstawowe parametry czujników pozycji kulki^a.

Parametr	Wartość
Napięcie zasilania	4,5 – 5,5 V
Zasięg	4 – 30 cm
Typ sygnału	Analogowy, napięcie 0,25 – 3,1 V

^a opracowanie własne na podstawie [7].

Czujniki zostały zamontowane na uchwytych umożliwiających regulację wysokości oraz pochylenia względem belki (zob. rozdział 2.5). Odległość między czujnikami to 40 cm (powyżej górnej granicy zakresu pracy), a ich wysokość nad belką to 4 cm.

Charakterystyka każdego z czujników jest mocno nieliniowa (zob. fig. 3.3). Dobłą aproksymację charakterystyki można otrzymać (po odcięciu wartości poniżej 3 cm) za pomocą funkcji postaci $y = ax^b + c$ (zob. tabela 3.6)¹. Jednakże z powodu dużej złożoności obliczeniowej liczenia potęg niecałkowitych zrezygnowano z implementacji takich aproksymacji w sterowniku PLC.

Wobec utrudnień spowodowanych złożonością obliczeniową zastosowano inne rozwiązanie w celu obliczenia pozycji kulki: aproksymację liniową pomiędzy punktami charakterystyki. W tym celu wpro-

¹ Wzór właściwy dla odległości do kulki w funkcji wartości z czujnika, tj. po „zamianie” osi wykresu z figury 3.3.

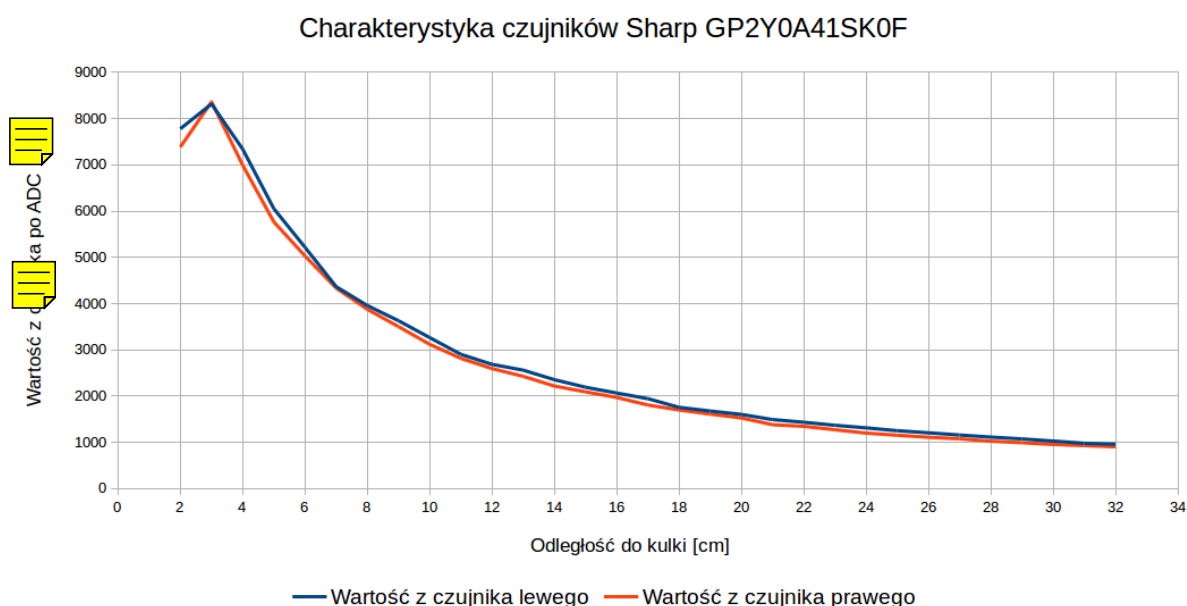


Fig. 3.3. Charakterystyka czujników odległości.

Tabela 3.6. Funkcje aproksymujące charakterystyki czujników.

Czujnik	Funkcja aproksymująca	Wartość błędu <i>RSME</i>
Lewy ^a	$y = 98x^{-0,8229} - 2,651$	0,197
Prawy ^a	$y = 8166x^{-0,8055} - 2,525$	0,2639

^a czujnik określony jako „lewy” jest bardziej oddalony od zespołu napędowego.

wadzano punkty charakterystyki każdego z czujników (pary: wartość z czujnika po przetworniku ADC, odległość do kulki) do dwóch tablic w sterowniku PLC.

Oba czujniki są równoodległe ($x_d = 20$ cm) od środka belki, co oznacza, że aby uzyskać wychylenie środka kulki od środka belki, należy transformować układy odniesienia czujników, co ilustruje figura 3.4. Mając dwie odległości d_l oraz d_r od czujników do kulki, położenie kulki x_b obliczana jest w następujący sposób:

$$d_b = \frac{d_l + 2 \cdot d_c - d_r}{2} + d_c \quad (3.2)$$

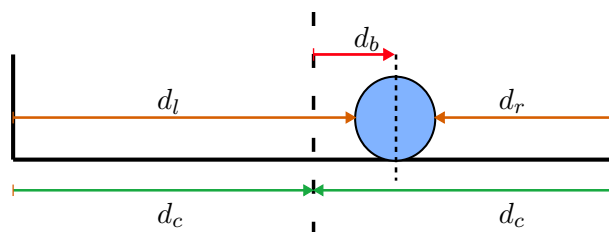


Fig. 3.4. Położenie kulki względem środka belki i czujników.

3.4. Czujnik bazowania

Z powodu wykorzystania enkodera inkrementalnego konieczne jest przeprowadzenie procedury bazowania (zob. rozdział 7) w celu określenia dokładnej pozycji kątowej wału silnika, a co za tym idzie: pozycji kątowej belki.

Do wykrycia pozycji bazowania wykorzystano transoptor szczelinowy TCST1103 firmy Vishay Semiconductors połączony w układzie przedstawionym na figurze 3.5, natomiast podstawowe parametry transoptora zostały opisane w tabeli 3.2.

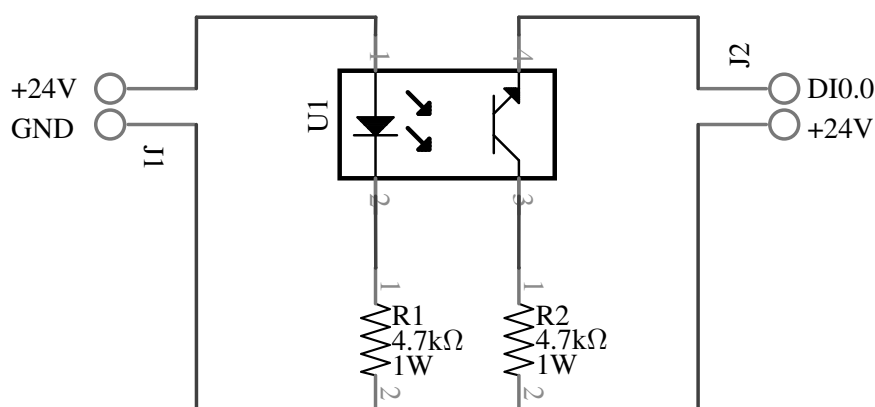


Fig. 3.5. Schemat podłączenia układu transoptora.

Tabela 3.7. Podstawowe parametry transoptora szczelinowego^a.

Parametr	Wartość
Szerokość szczeliny	3 mm
Maks. natężenie przewodzenia diody	60 mA
Maks. napięcie kolektor-emiter	70 V
Współczynnik wzmocnienia prądowego	0,2

^a opracowanie własne na podstawie [8].

Układ z figury 3.5 przylutowano do płytki uniwersalnej. Elementy J1 oraz J2 reprezentują złącza ARK (raster 2,54 mm), za pomocą których zrealizowano połączenia elektryczne z zasilaniem oraz sterownikiem PLC.

Płytkę z czujnikiem bazowania została przyklejona do układu kulki i belki poniżej silnika. Sztywny, lekki i nieprzezroczysty element przyczepiony został na końcu korby tak, aby przechodził przez szczelinę enkodera w momencie skierowania korby pionowo w dół. Przyjęto, że w chwili zasłonięcia szczeliny (przy ruchu zgodnie ze wskazówkami zegara) sygnał powinien otrzymać wartość 75.

3.5. Systemy napięć

Jak można zauważyć, elementy elektroniczne i elektromechaniczne użyte do zbudowania obiektu sterowania korzystają z poziomów logicznych różnych napięciach. Wynika to z faktu połączenia obiektu typowo przemysłowego, jakim jest sterownik PLC Siemens S7-1211C, który wykorzystuje napięcie 24 V, oraz elektroniki hobbystycznej (czujniki odległości, mostek H, enkoder), która wykorzystuje napięcia 5 V. Dodatkowym utrudnieniem jest element wykonawczy, tj. silnik prądu stałego, o napięciu znamionowym 12V.

Tabela 3.8. Podział elementów elektronicznych ze względu na wykorzystywany poziom napięcia.

Element	Napięcie
Sterownik PLC	24 V
Płytki sygnałowa	5 V
Mostek H (logika)	5 V
Mostek H (zasilanie silnika) ^{a]}	12 V
Enkoder	5 V
Czujniki odległości (zasilanie)	5 V
Czujniki odległości (wyjście analogowe)	0,25 – 3,1 V
Sterownik PLC (wejścia analogowe)	0 – 10 V
Czujnik bazowania	24 V
Przyciski	24 V
Dioda sygnalizacyjna	24 V

^a wartość napięcia znamionowego silnika, zob. tab. 3.2.


Obecność trzech systemów napięcia skutkowało użyciem trzech oddzielnych zasilaczy: 24 V o mocy 60 W, 12 V o mocy 15 W, 5 V o mocy 12,5 W. Wszystkie zasilacze zostały połączone wspólną masą.

3.6. Okablowanie i zabezpieczenia

Połączenia elektryczne pomiędzy komponentami pracy zrealizowano za pomocą kabli o przekroju 0,75 mm². Za wyjątkiem złącza silnika i enkodera, wszystkie przewody zakończone są tulejami, co jest konieczne z powodu zastosowania złącz śrubowych.

Zasilanie zostało zabezpieczone wyłącznikiem nadprądowym klasy B10.

Wyłącznik nadprądowy, zasilacz 12 V, zasilacz 24 V oraz sterownik PLC zostały przymocowane do wspólnej szyny DIN (TH 35). Dodatkowo zamontowano na niej listwy zaciskowe dla każdego poziomu

napięcia (zob. rozdział 3.5): 0 V (wspólna masa), 5 V, 25 V. Z napięcia 12 V korzysta tylko silnik, więc to połączenie zostało zrealizowane bezpośrednio, bez użycia listwy zaciskowej. 

3.7. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono układy elektryczne, elektroniczne i elektromechaniczne wykorzystane do stworzenia obiektu typu kulka i belka. Następnie przystąpiono do opisania poszczególnych elementów: sterownika PLC, płytki sygnałowej, silnika, enkodera, mostku H i czujników odległości. Przedstawiono charakterystyki czujników, sposób ich implementacji w sterowniku oraz sposób obliczania pozycji kulki. Następnie przedstawiono czujnik wykorzystywany do bazowania.

W kolejnych podrozdziałach poruszono kwestię różnych systemów napięć, zastosowanych zasilaczy, zabezpieczeń, okablowania i organizacji przewodów.

4. Model symulacyjny

Lorem ipsum.

5. Model matematyczny

Lorem ipsum.

6. Identyfikacja

Lorem ipsum.

7. Algorytmy sterowania

Lorem ipsum.

8. Algorytmy samostrojenja

Lorem ipsum.

9. Symulacje i eksperymenty

Lorem ipsum.

10. Wnioski

Lorem ipsum.

A. Warianty zespołu napędowego

Text of Appendix A is here.

B. Alternatywne czujniki pozycji kulki

Text of Appendix B is here.

Bibliografia

- [1] Wei Wang. *Control of a Ball and Beam System*. June 5, 2007. URL: http://data.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/projects/2007/BallBeam/Wei_Final_Thesis.pdf.
- [2] Marta Virseda. *Modeling and Control of the Ball and Beam Process*. Mar. 2004. URL: <http://www.control.lth.se/documents/2004/5736.pdf>.
- [3] Krzysztof Nowopolski. "Implementation of ball-and-beam control system as an instance of simulink to 32-bit microcontroller interface". In: *Poznan University of Technology Academic Journals* (2013).
- [4] Siemens. *SIMATIC S7-1200 Easy Book*. Sty. 2015.
- [5] Pololu. *19:1 Metal Gearmotor 37Dx68L mm with 64 CPR Encoder*. URL: <https://www.pololu.com/product/2822>.
- [6] Pololu. *BD65496MUV Single Brushed DC Motor Driver Carrier*. URL: <https://www.pololu.com/product/2960/specs>.
- [7] Sharp. *Analog Output Type Distance Measuring Sensor GP2Y0A41SK0F Specification*. Apr. 25, 2005. URL: https://cdn.sharpsde.com/fileadmin/products/Optoelectronics/Sensors/Specs/GP2Y0A41SK0F_25Apr05_Spec_ED05G101.pdf.
- [8] Vishay Semiconductors. *Transmissive Optical Sensor with Phototransistor Output*. Aug. 17, 2009. URL: <http://www.vishay.com/docs/83764/tcst1103.pdf>.

Spis rysunków

2.1	Uproszczony schemat systemu typu kulka i belka.	9
2.2	Zdjęcie produktu <i>Ball and Beam</i> firmy Quanser. Źródło: http://www.quanser.com/Products/ball_beam	10
2.3	Render projektu CAD.	10

2.4	Zdjęcie obiektu regulacji w trakcie budowy.	11
2.5	Schemat napędu opartego o mechanizm korbowy.	12
2.6	Schemat przekroju belki z zaznaczonymi ceownikiem aluminiowym i kątownikiem aluminiowym.	12
2.7	Schemat uchwytu na czujnik odległości w rzucie od przodu i z boku. Zastosowanie mocowania na śrubie pozwala pochylać czujnik względem belki.	13
2.8	Zdjęcie kulki.	13
3.1	Schemat układu sterowania i instrumentacji wraz z zaznaczonymi połączeniami.	15
3.2	Zdjęcie układu mostka H (Pololu BD65496MUV). Źródło: https://www.pololu.com/product/2960	18
3.3	Charakterystyka czujników odległości.	20
3.4	Położenie kulki względem środka belki i czujników.	20
3.5	Schemat podłączenia układu transoptora.	21

Spis tablic

3.1	Podstawowe parametry sterownika PLC Siemens S7-1211C i płytki sygnałowej Siemens SB 1223.	16
3.2	Parametry producenta silnika, enkodera i przekładni.	17
3.3	Najważniejsze parametry mostka H.	18
3.4	Opis złącz mostka H.	18
3.5	Podstawowe parametry czujników pozycji kulki.	19
3.6	Funkcje aproksymujące charakterystyki czujników.	20
3.7	Podstawowe parametry transoptora szczelinowego.	21
3.8	Podział elementów elektronicznych ze względu na wykorzystywany poziom napięcia.	22