

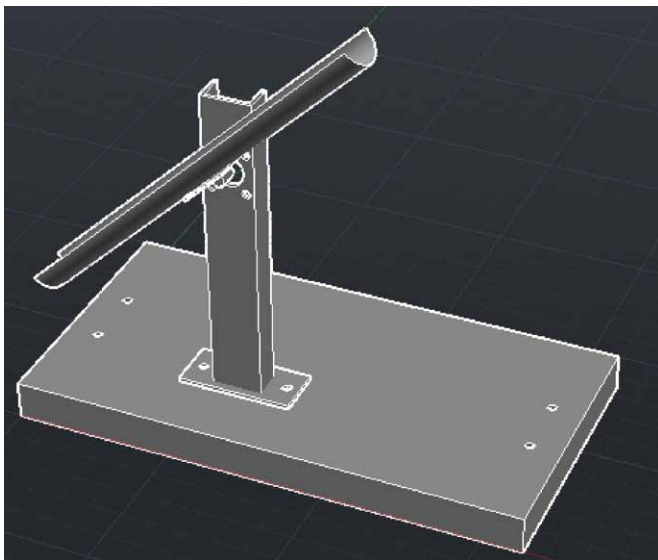
Wykonanie i sterowanie układem stabilizacji obiektu na równi pochyłej

Marek Przygoda, Paweł Sarnowski, Robert Piotrowski

1. Wprowadzenie

Platforma *ball and beam* nie jest typowym urządzeniem wykorzystywanym w przemyśle, jednak doskonale odzwierciedla dynamikę urządzeń, w których stosuje się specjalizowane systemy sterowania. Wiele klasycznych i nowoczesnych algorytmów regulacji można wykorzystać do stabilizacji piłki na równi, a co za tym idzie – w pełni poznać i zrozumieć zasadę ich działania. System ten jest często spotykany w sytuacji, gdy rozważany jest problem sterowania jednowymiarowym obiektem nieliniowym. Jest on coraz bardziej popularny i staje się ważnym fizycznym modelem laboratoryjnym do nauczania inżynierii systemów sterowania. Projekt ten może służyć do testowania różnych strategii sterowania, a także jako narzędzie szkoleniowe wielu procesów przemysłowych (np. przemysł chemiczny, lotniczy).

System *ball and beam* ma na celu utrzymanie piłki na równi pochyłej w zadanym punkcie. Urządzenie to składa się z trzech części: równi pochyłej (z urządzeniami pomiarowymi), na której umieszczona jest piłka; urządzeń wykonawczych (serwomotor, silnik itp.); algorytmów filtracji i sterowania (zaimplementowanych w mikrokontrolerze, sterowniku programowalnym itp.). Kulka znajdująca się w prowadnicy, za pomocą urządzenia wykonawczego (kontrolowanego przez system sterowania), utrzymuje się w zadanym położeniu lub podąża za wyznaczoną trajektorią, w obecności zakłóceń. Podstawowym urządzeniem pomiarowym położenia jest najczęściej specjalne optoelektryczne urządzenie pomiarowe.



Rys. 1. Model części urządzenia wykonany w środowisku AutoCAD

Streszczenie: Platforma *ball and beam* jest jednym z najbardziej popularnych fizycznych modeli laboratoryjnych przydatnych w nauczaniu inżynierii systemów sterowania. W artykule przedstawiono projekt, wykonanie i oprogramowanie platformy *ball and beam*. Opisano proces doboru i implementacji filtrów sygnałów pomiarowych oraz syntezę algorytmu sterowania.

Słowa kluczowe: równia pochyła, systemy sterowania, regulator PID, regulacja kaskadowa, sterowanie pozycją, serwo-mechanizm

Abstract: *The ball and beam system is one of the most popular and important physical laboratory models for teaching control systems engineering. The paper presents the project, construction and programming of ball and beam platform. Moreover, the filtering of measurements signals and control algorithm were developed.*

Keywords: *ball and beam, control systems, PID control, cascade control, position control, servomechanism*

Rozpatrywane zagadnienie jest ciekawe, aktualne i badane w różnych ośrodkach naukowych. W pracy [1] przedstawiono sterowanie rozmyte dla platformy *ball and beam*. Problem sterowania został podjęty również w pracy [2], gdzie wykorzystano regulację PID ze zmiennymi wzmocnieniami. W pracy [3] zaprojektowano sterowanie za pomocą regulatora LQR (ang. *Linear Quadratic Regulator*).

W artykule przedstawiono projekt techniczny i wykonanie platformy stabilizującej *ball and beam*. Opisano wykorzystane elementy mechaniczne i elektryczne, z których zbudowano urządzenie oraz zaimplementowane algorytmy filtracji i sterowania.

2. Założenia projektowe

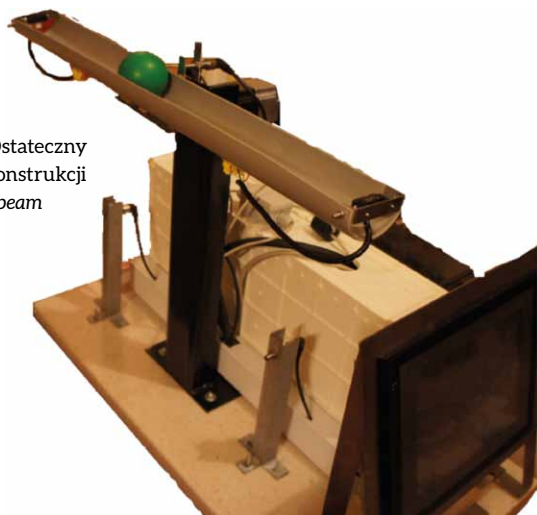
Założeniem projektu było wykonanie urządzenia służącego do testowania i weryfikacji algorytmów filtracji i sterowania. Komponenty konstrukcji oraz oprogramowanie są powszechnie spotykane w szeroko rozumianej inżynierii.

3. Konstrukcja mechaniczna

3.1. Podstawowe informacje

Podstawowe elementy konstrukcji mechanicznej, takie jak podstawa, ceownik, równia pochyła wraz z odpowiednio naznaczonymi otworami, zostały zaprojektowane w środowisku AutoCAD [4] (patrz rys. 1).

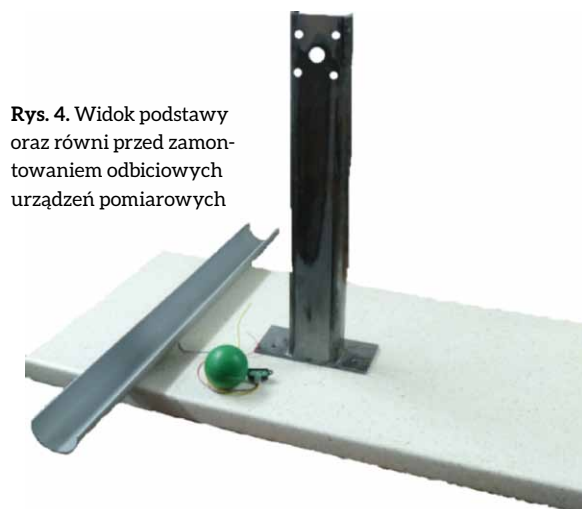
Rys. 2. Ostateczny widok konstrukcji *ball and beam*



Rys. 3. Serwomotor zamontowany na ceowniku

Tabela 1. Podstawowe parametry techniczne

	Wielkość	Wartość
Wymiary urządzenia	Wysokość	560 [mm]
	Długość	815 [mm]
	Szerokość	420 [mm]
	Masa	25 [kg]
Równia pochyła	Długość	700 [mm]
	Szerokość	70 [mm]
	Materiał	PVC
	Kształt	Półokrągły
Piłka	Promień	50 [mm]
	Materiał	Tworzywo sztuczne
	Masa	10 [g]



Rys. 4. Widok podstawy oraz równi przed zamontowaniem odbiciowych urządzeń pomiarowych

Część mechaniczną projektu wykonano z powszechnie dostępnych materiałów, mianowicie: stalowych kształtowników, rury PVC oraz drewnianej podstawy. Na rys. 2 przedstawiono kompletne urządzenie *ball and beam*.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry fizyczne urządzenia.

3.2. Dobór i montaż silnika

Przed przystąpieniem do budowy całej konstrukcji *ball and beam* wybrano urządzenie wykonawcze, serwomotor marki Omron typ R7M-AP40030 [5]. Jest to asynchroniczny silnik prądu przemiennego z magnesami trwałymi oraz wbudowanym enkoderem o rozdzielczości 12 bitów. Po doborze silnika, który jest odpowiedzialny za regulację pozycji piłki, wybrano odpowiedni stojak, na którym umieszczono serwomotor. Jest to ceownik o wymiarach 500 × 80 × 45 mm, wykonany z blachy o grubości 5 mm i wadze 3 kg. Rys. 3 przedstawia widok kształtownika po zamontowaniu silnika.

3.3. Montaż równi pochyłej oraz odbiciowych urządzeń pomiarowych

Kolejnym krokiem był wybór materiału do wykonania równi. Z wcześniejszych doświadczeń (budowa prototypów) wyciągnięto wnioski i zastosowano bardzo lekki materiał o odpowied-

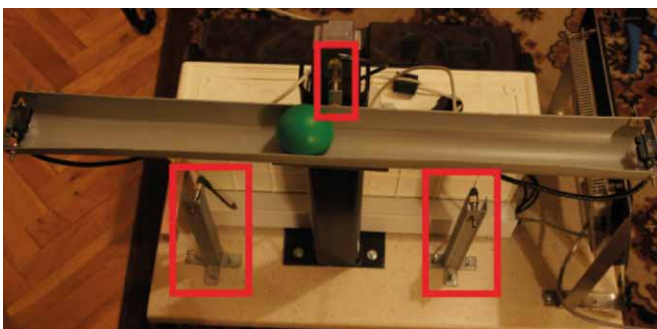
nim kształcie (półokrąg, dobrany pod wymiary piłki – średnica 60 mm). W początkowych fazach projektu zauważono, że rozmieszczone naprzeciw siebie czujniki odbiciowe zakłócają się wzajemnie, gdy są prześwity na ich drodze, dlatego w tym wypadku piłka, która stoi pomiędzy czujnikami, idealnie je oddziela. Wykorzystano do tego rurę z tworzywa PVC. Na rys. 4 pokazano elementy przed montażem urządzeń pomiarowych.

Znając liczbę elementów oraz ich szacunkową masę, dobrano podstawę, na której umieszczono pozostałe elementy (urządzenie wykonawcze, szafa sterownicza, panel operatorski). Została ona wykonana z laminowanej wiórowej płyty o wymiarach 815 × 430 × 40 mm. Przy montażu koła pasowego do wału silnika zastosowano połączenie klinowe. Urządzenia pomiarowe rozmieszczono na przeciwległych bokach prowadnicy (patrz rys. 5).

Ostatnim etapem konstrukcji mechanicznej było zastosowanie indukcyjnych urządzeń pomiarowych (patrz rys. 6). Umieszczono trzy indukcyjne urządzenia pomiarowe firmy Omron. Służą one jako wyłączniki krańcowe (zapobieganie obrotu równi o zbyt duży kąt). Jeżeli w jakimś przypadku równia znajdzie się w położeniu większym niż 30°, to umiejscowione



Rys. 5. Odbiciowe urządzenie pomiarowe zamontowane na równi pochyłej



Rys. 6. Umieszczenie czujników indukcyjnych

po lewej i prawej stronie równi czujniki indukcyjne poinformują układ sterowania o pozycji krańcowej układu wykonawczego i odłączą zasilanie dla serwomechanizmu. Trzeci czujnik umieszczono na środku równi i jego funkcją jest wyszukanie pozycji poziomej dla prowadnicy tuż po załączeniu urządzenia.

4. Konstrukcja elektroniczna

4.1. Dobór urządzeń elektrycznych

Urządzeniem sterującym jest sterownik PLC (ang. *Programmable Logic Controller*) Omron CJ1M z procesorem CPU23 [6] do przetwarzania danych wejściowych (tj. informacji o położeniu obiektu na równi, prędkości silnika, stanie logicznym wyłączników krańcowych, poleceń wysyłanych z panelu operatorskiego), sterowania urządzeniem i wystawianiem innych sygnałów (zadanego kąta obrotu silnika, stanów logicznych na lampkach kontrolnych, informacji na panelu operatorskim).

Do PLC dodano również moduł 4 wejść i 2 wyjść analogowych, który połączono między innymi z czujnikami fotoelektrycznymi odbiciowymi Sharp GP2Y0A21YK0F [7], służącymi do pomiaru odległości.

Pracą całego urządzenia można sterować poprzez panel operatorski HMI (ang. *Human Machine Interface*) Omron NSJ10-V1 [8]. Główne okno zaprezentowano na rys. 7.

Wizualizację całego procesu wykonano w programie CX Designer [9]. Wykonano aplikację, w której użytkownik może ustawiać żadaną pozycję piłki, wyświetlać ją na bieżąco, zmieniać parametry regulatora PID, odczytać stan maszyny oraz diagnozować występujące alarmy.



Rys. 7. Panel operatorski – główne okno

4.2. Dobór przewodów elektrycznych

Maksymalny prąd pobierany przez urządzenie wynosi $I_{max} = 8,98$ A. Wybrano wyłącznik nadprądowy Legrand C10 [10], gdyż jego wartość rozłączania obwodu 10 A jest najbliższa 8,98 A oraz ze względu na jego charakterystykę typu C, która umożliwia umieszczenie w obwodzie silnika, którego chwilowe prądy rozruchowe będą większe niż podane na tablicy znamionowej.

W opisywanym przypadku dla obwodów siłowych wybrano przewód miedziany H07V-K 1x1,5 mm² firmy LappKabel, o przekroju 1,5 mm² [11]. Poprawność jego wytypowania sprawdzono na podstawie trzech warunków.

W pierwszej kolejności zbadano, czy maksymalny prąd płynący w obwodzie będzie mniejszy bądź równy prądowi wyłączenia przez bezpiecznik, a ten z kolei mniejszy bądź równy obciążalności długotrwałej przewodu, co zapisać można jako:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \quad (1)$$

gdzie: I_B – prąd, jaki płynie w obwodzie [A]; I_N – prąd znamionowy wyłączenia przez bezpiecznik [A]; I_Z – obciążalność prądowa długotrwała przewodu [A].

W przypadku H07V-K 1 x 1,5 mm² wyrażenie $8,98A \leq 10A \leq 16A$ jest spełnione.

Drugim warunkiem było sprawdzenie, czy obciążalność długotrwała przewodu jest większa od wartości iloczynu prądu wyłączenia przez bezpiecznik i współczynnika k .

$$I_2 \leq 1,45I_Z \quad (2)$$

oraz I_2 zapisać można jako:

$$I_2 = k \cdot I_N \quad (3)$$

gdzie: I_2 – wartość prądu powodująca zadziałanie urządzenia zabezpieczającego w określonym czasie [A]; I_Z – obciążalność prądowa długotrwała przewodu [A]; k – współczynnik krotno-

ści prądu powodujący zadziałanie urządzenia zabezpieczające (dla wyłączników nadprądowych o charakterystyce C równy 1,45); I_N – prąd znamionowy wyłączenia przez bezpiecznik [A].

W przypadku H07V-K 1 x 1,5 mm² wyrażenie $1,45 \cdot 10A \leq 1,9545 \cdot 16A$ jest spełnione.

Przy doborze przewodów należy uwzględnić ponadto spadki napięć (4), założono, że nie może być większy niż 5%. Rozpatrując podany przypadek zaobserwowano, iż ich maksymalna długość nie przekraczała około 1 m, więc nie powinna mieć wpływu na działanie układu.

$$dU = \frac{2 \cdot l \cdot I}{\lambda \cdot A} \cdot \cos\varphi = \frac{2 \cdot 1 \cdot 8,98}{57 \cdot 1,5} \cdot 0,95 = \frac{17,062}{85,5} = 0,19V \quad (4)$$

gdzie: l – długość przewodu [m]; I – maksymalny prąd płynący przez obwód [A]; λ – przewodność właściwa (dla miedzi równa 75); A – przekrój poprzeczny przewodu [mm²]; $\cos\varphi$ – współczynnik mocy [-].

Spadek napięcia stanowi mniej niż 0,1% zasilania, co jest mniejsze niż 5% dopuszczalnego, zatem trzeci warunek również jest spełniony.

Wszystkie warunki zostały spełnione, więc jako przewodu siłowego użyto przewodu czarnego H07V-K 1 x 1,5 mm². Zastosowany przewód ochronny posiada żółtozieloną barwę i taki sam przekrój jak siłowy. Okablowanie sterownicze nie będzie obciążane prądem większym niż 2 A, więc wybrano ciemnoniebieski przewód H05V-K 1 x 0,5 mm². Wszystkie schematy połączeń elektrycznych wykonano w programie PC Schematic [12].

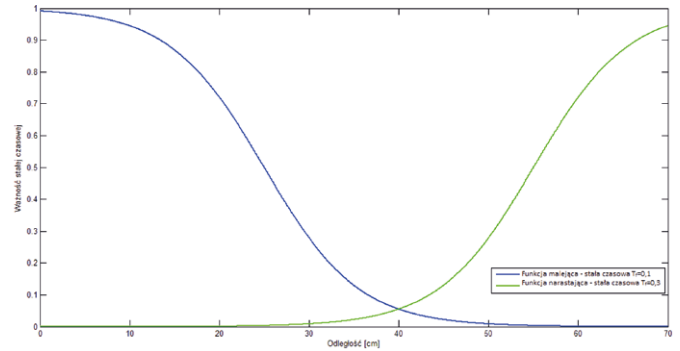
5. Przygotowanie sygnałów pomiarowych

Ze względu na nieliniową charakterystykę czujnika Sharp GP2Y0A21YK0F [7], w celu poprawnego przeliczenia odległości, zgromadzono dane na temat napięcia wysyłanego przez czujnik zależnie od odległości dzielącego go od przedmiotu. Dokonano aproksymacji wielomianem piątego stopnia zgodnie z zależnością:

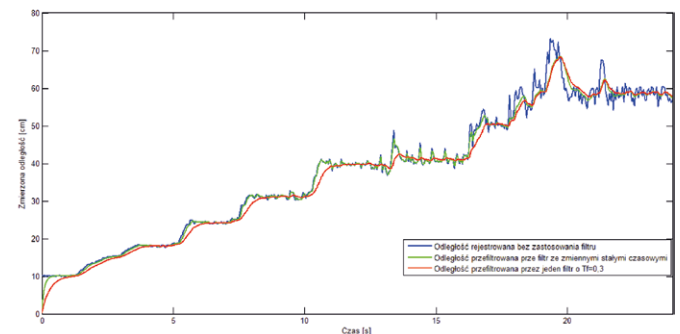
$$o = -2,4 \cdot 10^{-14} \cdot y^5 + 1,6333 \cdot 10^{-10} \cdot y^4 - 4,399 \cdot 10^{-7} \cdot y^3 + 5,9785 \cdot 10^{-4} \cdot y^2 - 0,432 \cdot y + 156,270 \quad (5)$$

gdzie: o – przeliczona odległość piłki od końca równi [cm]; y – wartość napięcia na zaciskach czujnika z zakresu 0–10 V mierzona przez przetwornik analogowo-cyfrowy o rozdzielczości 2000 bitów [V/2000].

Wraz ze wzrostem odległości czujnika od obiektu zmniejsza się jego rozdzielczość, a co za tym idzie – jakość pomiaru. Zgodnie z charakterystyką czujnika, przykładowo od odległości 50 cm do 45 cm, na pomiar przypada $\Delta 0,06875V$, zaś od 10 cm do 15 cm $\Delta 0,75V$, co daje prawie dziesięć razy mniejszą rozdzielczość. W wyniku tego, przy dalszych odległościach, duży wpływ na zmniejszanie jakości pomiaru zaczyna mieć szum pomiarowy. W celu zniwelowania jego skutków zaimplementowano filtr dolnoprzepustowy pierwszego rzędu o transmitancji operatorowej:



Rys. 8. Funkcja przełączająca stałe czasowe w filtrze



Rys. 9. Zarejestrowany przebieg pomiaru odległości wraz z przefiltrowanym sygnałem

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{T_f \cdot s + 1} \quad (6)$$

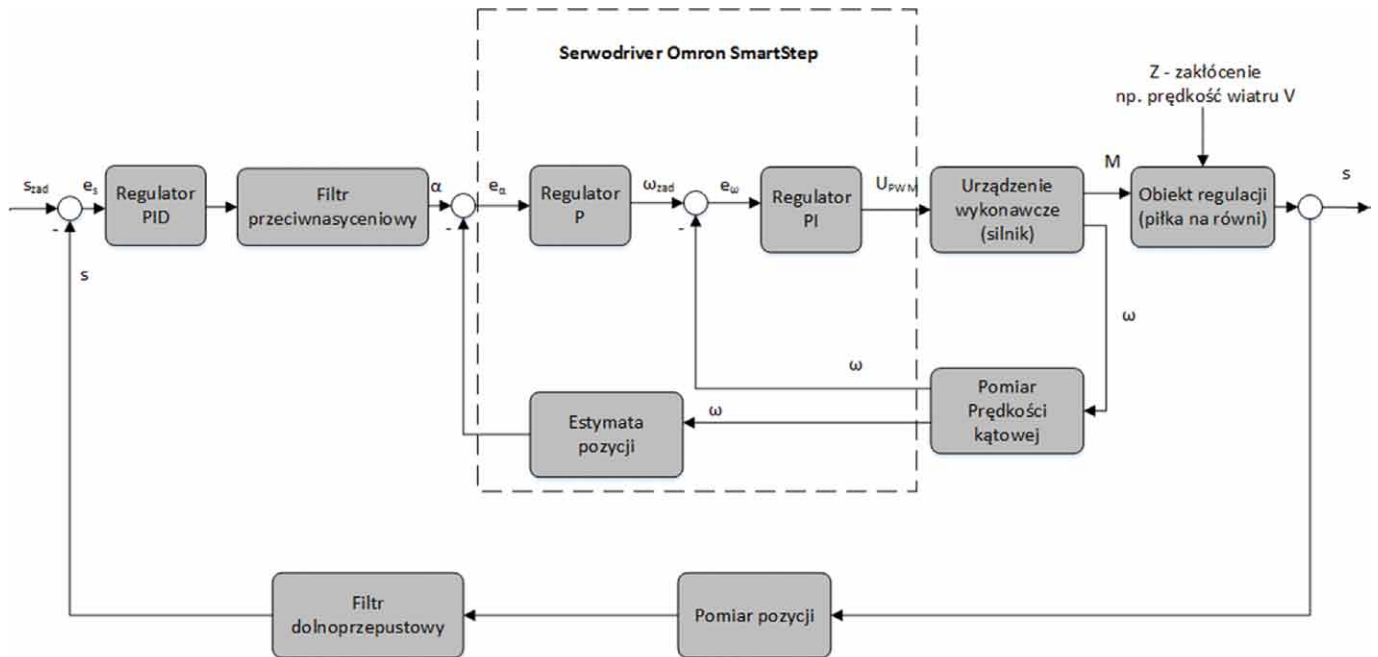
gdzie: T_f – stała czasowa filtra [s].

W procesie dyskretyzacji [13] wykorzystano przybliżenie całki metodą trapezów. Po przeprowadzeniu przekształceń równanie filtra dolnoprzepustowego jest postaci:

$$Y[k] = \left(\frac{2T_f - T_p}{T_p + 2T_f} \right) \cdot Y[k - 1] + \left(\frac{T_p}{T_p + 2T_f} \right) \cdot U[k - 1] + \left(\frac{T_f}{T_p + 2T_f} \right) \cdot U[k] \quad (7)$$

gdzie: T_p – okres próbkowania [s].

Dobranie częstotliwości odcięcia filtra rozpoczęto od zebrania danych pomiarowych. W tym celu wykonano eksperyment polegający na oddalaniu obiektu od czujnika, zapisywaniu danych pomiarowych i poddaniu ich filtracji. Zauważono, że dobranie dużej stałej czasowej filtra $T_{f1} = 0,3$ s powodowało opóźnienia (nawet dwusekundowe) w wysyłaniu informacji o położeniu. Mała wartość $T_{f2} = 0,1$ s nie gwarantowała zaś redukcji szumów w odległości większej niż 40 cm. Zdecydowano się więc na zastosowanie zmiennej stałej czasowej T_f w zależności od odległości o obiektu od urządzenia pomiarowego.



Rys. 10. Schemat blokowy układu regulacji

gdzie: s – odległość obiektu od początku równi pochyłej (mierzone od jednej ze stron) [cm]; e_s – uchyb odległość obiektu [cm]; α – kąt nachylenia równi pochyłej [°]; e_α – uchyb kąta nachylenia równi pochyłej [°]; ω_{zad} – zadana prędkość kątowa silnika [°/s]; ω – prędkość kątowa silnika [°/s]; e_ω – uchyb prędkości kątowej silnika; U_{PWM} – napięcie PWM (ang. Pulse-Width Modulation) podawane na silnik [V]; M – moment obrotowy [N*m]; V – prędkość wiatru (zakłócenie) [m/s]

Wykorzystano do tego następującą funkcję:

$$ksztalt_{s,z} = \frac{1}{1 + e^{ab(o-c)}} \quad (8)$$

gdzie: a – współczynnik odpowiedzialny za kształt funkcji; b – współczynnik o wartości 1 lub -1 określający monotoniczność funkcji; c – współczynnik opisujący punkt na osi x stanowiący połowę maksymalnej wartości, którą może przyjąć funkcja.

Na wejście dwóch funkcji (8) (o parametrach dla malejącej $a_1 = 0,19$; $b_1 = 1,25$; $c_1 = 25$, zaś rosnącej $a_2 = 0,19$; $b_2 = -1,55$; $c_2 = 25$), przedstawione na rys. 8, wprowadzany jest zaszumiony dystans o , a zwracane są wagi przynależności wybranych dwóch stałych czasowych filtru. Wagi te są odpowiednio wymnażane przez stałe czasowe równe 0,1 i 0,3 i następnie sumowane. Wynik tej operacji stanowi ostateczną stałą czasową filtru. Wyniki filtracji pokazano na rys. 9. Wraz ze wzrostem odległości filtr przełączany zaczyna przypominać działaniem filtr z niezmienną stałą czasową, tj. odfiltrowuje skutecznie sygnał przy zwiększonej częstotliwości szumów pomiarowych, ale odznacza się mniejszym opóźnieniem.

6. Układy sterowania

Na rys. 10 przedstawiono układ regulacji urządzeniem *ball and beam*. W projekcie zaprojektowano układ regulacji złożony z 3 regulatorów połączonych kaskadowo, co pozwala na osiągnięcie wysokiej dokładności pozycji oraz dużą funkcjo-

nalność struktury. Wielkością sterowaną jest odległość piłki na równi pochyłej od jednego z boków s . Wielkością sterującą jest sygnał U_{PWM} zadawany na urządzenie wykonawcze – silnik. Sygnałem zakłócającym jest prędkość wiatru V , która wpływa na położenie piłki.

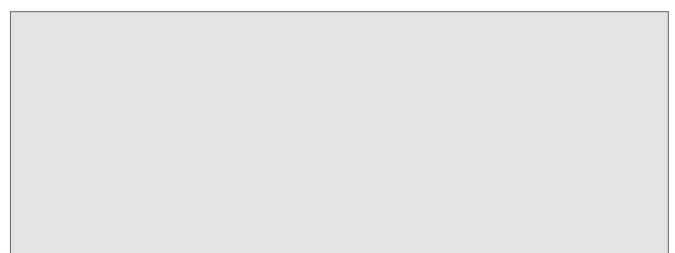
Pierwszy z regulatorów to zaimplementowany w PLC regulator PID. Kolejne dwa regulatory umieszczone w serwodriverze (P od położenia kąta i PI od prędkości obrotowej) zostały zaimplementowane przez producenta, który w jednym z regulatorów zastosował odczyt pozycji poprzez estymację pomiaru prędkości kątowej.

6.1. Układ z regulatorem PID

Regulator PID składa się z trzech członów: proporcjonalnego, całkującego, różniczkującego [14]. Sygnał wyjściowy opisuje następujące równanie:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^\infty e(t)dt + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

reklama



gdzie: $u(t)$ – sygnał sterujący; $e(t)$ – uchyb sterowania; k_p – wzmacnienie członu proporcjonalnego; k_i – wzmacnienie członu całkującego (odwrotność stałej czasowej całkowania T_i); k_d – wzmacnienie członu różniczkującego (odwrotność stałej czasowej różniczkowania T_d).

W praktycznej realizacji algorytmu regulatora należy uwzględnić ograniczenia sygnału wyjściowego, ze względu na fizyczne ograniczenia urządzeń wykonawczych. Zastosowano strukturę z układem przeciwnasyceniowym. Polega ona na powstrzymaniu sumowania przyrostów sygnałów, gdy sygnał wyjściowy osiąga ograniczenie (10).

$$e_{aw} = u_{sat}(t) - u(t) \quad (10)$$

gdzie: e_{aw} – uchyb w układzie przeciwnasyceniowym (różnica między sygnałami sterującymi przed i za nasyceniem); $u_{sat}(t)$ – sygnał sterujący za nasyceniem; $u(t)$ – sygnał sterujący.

Ostatecznie:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^{\infty} (e(t) + k_{aw} \cdot e_{aw}) dt + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Wyrażenie (11) przedstawione jest w ciągłej dziedzinie czasu, niemożliwej do zaimplementowania w urządzeniu cyfrowym ze względu na brak nieskończonej ilości pamięci (całkowanie odbywa się w czasie od 0 do ∞), a także dyskretną pracą (obliczenia odbywają się w stałym cyklu pracy). W celu uruchomienia regulatora w sterowniku programowalnym równanie (11) zostało poddane dyskretyzacji [13]. Człon całkujący został przybliżony sumą metodą prostokątów:

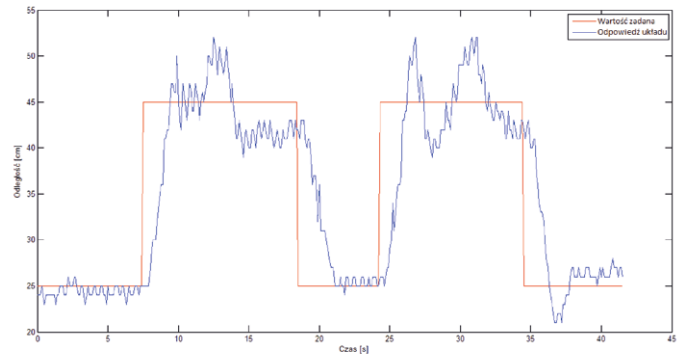
$$\int_0^{\infty} e(i)dt \approx T_p \cdot \sum_0^k e[k] \quad (12)$$

Człon różniczkowy przybliżono lewostronną aproksymacją pochodnych ilorazem różnicy wartości obecnej i poprzedniej z czasem próbkowania:

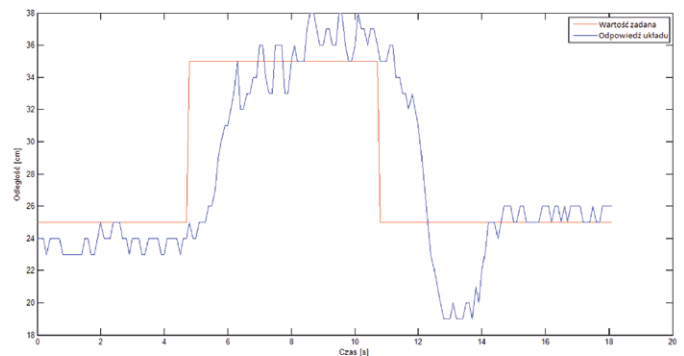
$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e[k] - e[k - 1]}{T_p} \quad (13)$$

7. Badania testowe

Proces strojenia rozpoczęto od regulatora znajdującego się w wewnętrznej pętli sterowania, czyli wbudowanego w serwo-driver Smartstep (patrz rys. 10). Producent tego przekształtnika udostępnił możliwość szybkiego przełączania się między jednym z sześciu zestawów parametrów regulatora. Przy próbie użycia ich w platformie *ball and beam* układ równi połączonej z wałem silnika (bez piłki) stawał się niestabilny. Dodatkowo nie istniała możliwość załączenia wbudowanego w serwo-driver automatycznego strojenia nastaw, gdyż algorytm ten zaczął działać po rozpędzeniu silnika do 500 obrotów/minutę (w opisywanym przypadku prędkości niemożliwej do uzyskania



Rys. 11. Odpowiedź układu z regulatorem PI



Rys. 12. Odpowiedź układu z regulatorem PID

w bezpiecznych warunkach). W związku z tym parametry dobrano metodą badań testowych. Dostępne zmienne regulatorów w serwodriverze to:

- wzmacnienie pętli prędkości (ang. *Speed Loop Gain*) – zwiększa prędkość serwomechanizmu (ustawiono na 250);
- stała czasowa pętli prędkości (ang. *Speed Loop Integral Time Constant*) – zwiększa dokładność oraz czas ustalenia pozycji (ustawiono na 300);
- wzmacnienie pętli pozycji (ang. *Position Loop Gain*) – zwiększa dokładność pozycji (ustawiono na 130).

Dobór parametrów rozpoczęto od zmniejszenia ich wartości ze standardowych do możliwie minimalnych, a następnie zwiększano każdy z nich i obserwowano reakcję układu. Istotną zmianą w porównaniu ze standardowymi nastawami było zwiększenie wzmacnienia proporcjonalnego prędkości oraz zmniejszenie zbyt dużej stałej całkowania. Duża wartość wzmacnienia pozycji pozwoliła regulatorowi zewnętrznemu na korekcję błędów regulatora prędkości zawartego w pętli wewnętrznej.

Dobór nastaw dla regulatora pozycji piłki na równi przeprowadzono metodą inżynierską (doświadczalny dobór przez wprowadzanie kolejnych nastaw i obserwowanie ich działania w urządzeniu). Kryterium doboru nastaw była jakość regulacji, a konkretnie minimalizacja uchybu pozycji piłki.


Testowano kilka konfiguracji regulatorów, rozpoczęto od P oraz PI. Regulator typu P stabilizował obiekt do granicznej wartości wzmocnienia wynoszącej w przybliżeniu 0,06, lecz zawsze z dużym uchybem w stanie ustalonym (nawet większym niż 5 cm). Dodanie członu całkującego spowodowało zmniejszenie uchybu w stanie ustalonym (od 0 do 2 cm), lecz spowodowało wzrost czasu regulacji. W wyniku testów ostatecznie ustawiono: $k_p = 0,039$ oraz $k_i = 0,015$, a odpowiedź układu pokazano na rys. 11. Kolejnym testowanym regulatorem był PID. Dobrane parametry regulatora wyniosły: $k_p = 0,02$; $k_i = 0,000028$ i $k_d = 0,00035$, a odpowiedź układu przedstawiono na rys. 12.

8. Podsumowanie

Celem artykułu było kompleksowe przedstawienie układu stabilizacji obiektu na równi pochyłej. Obejmowało to dobór komponentów mechanicznych, elektrycznych, jednostki centralnej, wykonanie konstrukcji mechanicznej oraz szafy sterowniczej, a także opracowanie algorytmów filtracji i sterowania. Podczas realizacji układu poszczególne elementy zaprojektowano w narzędziach komputerowych (AutoCAD, PC Schematic, pakiet oprogramowania CX-One), podłączono i zintegrowano z serwomechanizmem oraz urządzeniami pomiarowymi ze sterownikiem PLC. Następnie zaimplementowano filtr dolnoprzepustowy, regulator PID oraz układ automatycznego pozycjonowania. Na koniec zaprojektowano i wykonano wizualizację panelu operatorskiego.

Literatura

- [1] ABDULRAHMAN A., EMHEMED A.: *Fuzzy control for nonlinear ball and beam system*. International Journal of Fuzzy Logic Systems (IJFLS), Vol. 3 (2013), No. 1, pp. 25–32.
- [2] KRISHNA B., GANGOPADHYAY S., GEORGE J.: *Design and Simulation of Gain Scheduling PID Controller for Ball and Beam System*. International Conference on Systems, Signal Processing and Electronics Engineering (ICSSEE'2012), December 26–27, Dubai 2012.
- [3] WANG W.: *Control of a Ball and Beam System*. M.Tech Thesis, University of Adelaide, Australia 2007.
- [4] PIKOŃ A.: *AutoCAD 2013 PL. Pierwsze kroki*. Wydawnictwo Helion, Gliwice 2013.
- [5] Omron User's Manual SMARTSTEP A SERIES – Models R7M – A (Servomotors), R7D – AP (Servo Drivers) Servomotors/Servo Drivers, 2001.
- [6] CJ1M-CPU1 Specification, <http://www.ia.omron.com>, dostęp 10.02.2015.
- [7] Sharp GP2Y0A21YK0F Specification, http://www.sharpsma.com/webfm_send/1489, dostęp 10.02.2015.
- [8] Manual SYSMAC One NSJ Series, https://www.ia.omron.com/data_pdf/cat/nsj_v406-e1_7_1_csm2192.pdf?id=1751, dostęp 10.02.2015.
- [9] Manual NS-Series CX-Designer Ver. 3 http://www.fa.omron.com.cn/data_pdf/mnu/v099-e1-09_ns-cxdc1-v3.pdf?id=155, dostęp 10.02.2015.
- [10] PN-EN 60947-2:2006 Aparatura rozdzielcza i sterownicza niskonapięciowa – Część 2: Wyłączniki, 2006.
- [11] Dyrektywa Maszynowa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn, 2006.
- [12] PCSCHEMATIC Automation 16 – Podręcznik użytkownika, 2014.
- [13] BRZÓZKA J.: *Regulatory cyfrowe w automatyce*. Wydawnictwo MIKOM, Warszawa 2002.
- [14] BRZÓZKA J.: *Regulatory i układy automatyki*. Wydawnictwo MIKOM, Warszawa 2004.

 inż. Marek Przygoda – Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, e-mail: marekprzy@op.pl;
inż. Paweł Sarnowski – Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, e-mail: sarni20@gmail.com;
dr inż. Robert Piotrowski – Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, e-mail: robert.piotrowski@pg.gda.pl

artykuł recenzowany