

Mateusz MARKIEFKA<sup>1</sup>

Opiekun naukowy: Jacek RYSIŃSKI<sup>2</sup>

## UKŁAD STEROWANIA MINIMALIZUJĄCY WAHANIA ŁADUNKU

**Streszczenie:** Celem pracy, była analiza pracy układu regulacji wahań ładunku zawieszono na robocie przemysłowym. W oparciu o odczyty z czujnika oraz program sterujący wykonany przez sterownik PLC i robota przemysłowego, było realizowane tłumienie wahań ładunku swobodnie zawieszono na ramieniu robota. Aby to uzyskać należało zaprojektować i wykonać odpowiedni układ pomiarowy, napisać program sterujący, który wykorzystując dane z czujnika oraz regulator, przekazywał informację robotowi przemysłowemu w jaki sposób powinien poruszać osiami, aby wytłumić wahań. W programie sterującym wykorzystano regulator PID, zaimplementowany w sterowniku PLC, Astraada RCC972. Jako układ wykonawczy wykorzystano robota przemysłowego Kawasaki RS005L. Do komunikacji wszystkich urządzeń, wykorzystano protokoły komunikacyjne I<sup>2</sup>C, Modbus RTU oraz Ethernet/IP. Akwizycja danych zrealizowana została przez sterownik PLC na kartę pamięci SD.

**Słowa kluczowe:** regulacja, PLC, regulator PID, robot przemysłowy, układ pomiarowy, inklinometr

## CONTROL SYSTEM TO MINIMIZE LOAD SWING

**Summary:** The aim of the work was to analyze the operation of the load oscillation control system suspended on an industrial robot. Based on the readings from sensor and the control program performed by PLC and the industrial robot, the oscillation of the load freely suspended on the robot arm was suppressed. To achieve this, it was necessary to design and make an appropriate measurement system, write a control program which, using the data from sensor and the controller, define next movements of the robotic arm to suppress the oscillations. The control program uses a PID controller, implemented in the PLC controller, Astraada RCC972. An industrial robot Kawasaki RS005L was used as the executive system. The I<sup>2</sup>C, Modbus RTU and RtherNET/IP communication protocols were used for communication of all devices. Data acquisition was carried out by the PLC controller on the SD memory card.

**Keywords:** regulation, PLC, PID controller, industrial robot, measuring system, inclinometer

---

<sup>1</sup> mgr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, email: mmarkiefka4@gmail.com

<sup>2</sup> dr. inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, email: jrysinski@ath.bielsko.pl

## 1. Wprowadzenie

Szybki rozwój systemów i urządzeń związanych z procesami produkcyjnymi wymusza zwiększanie bezpieczeństwa, wydajności, dokładności i bezawaryjności. Jednakże automatyzacja tych procesów, pozwala ograniczyć koszty oraz odciążyć pracę człowieka. Do realizacji tych celów, należy zapewnić odpowiednie warunki oraz precyzyjne sterowanie. Aby spełnić te wymagania należy wykorzystać odpowiednie układy pomiarowe, układy regulacji oraz układy sterowania, które zintegrują urządzenia wykonawcze w jeden zespół.

Nieodzownym elementem rozwoju jest transport ładunków. Wykorzystywane dźwigi lub dźwignice, narażone są na wiele czynników zakłócających ich pracę m. in. bezwładność ładunku, siła wiatru, mała sztywność liny. Wymienione czynniki wpływają na wychylenia ładunku zawieszonoego na wysięgniku np. dźwigu i wydłużają czas ich transportu. Zła orientacja lub oczekiwanie na samoistne wygaszenie wahań wydłużają czas potrzebny na stabilizację. Bardzo doświadczeni operatorzy, mają wiedzę, w jaki sposób pokierować ładunkiem, aby wyeliminować te wahania, jednak takich osób jest coraz mniej. Zastosowanie odpowiednich układów sterowania

i regulacji, umożliwiłoby skrócenie transportu ładunków przy nieodpowiednich warunkach atmosferycznych lub w przypadku sterowania przez mało doświadczonego operatora. Jednak chcąc zautomatyzować taki proces, zadanie to należy powierzyć odpowiedniemu zespołowi sterowania.

Na podstawie przeglądu literatury z tematyki stabilizacji wahań ładunku przygotowano autorski projekt układu pomiarowego. Stwierdzono, że elementem wspólnym w każdym z analizowanych układów stabilizacji było tłumienie wahań w kierunku promieniowym i stycznym. Odczyt tych wychyleń był jednak realizowany na różne sposoby.

Prof. Jacek Kłosiński w swojej pracy [2] opisuje przykład sterowania modelem fizycznym żurawia wysięgnikowego, proporcjonalnie mniejszego od prawdziwego dźwigu. Celem jego pracy było sterowanie ruchami żurawia samojezdnego z jednego punktu do wyznaczonego, z minimalizacją wahań ładunku po zakończeniu ruchu. Do pomiaru wychyleń liny wykorzystano układ składający się z dwóch czujników indukcyjnych, umieszczony na końcu wysięgnika. Sprzężenie zwrotne z silnika hydraulicznego, sterującego obrotami żurawia, zrealizowano było w oparciu o odczyty impulsów z enkodera. Rolę regulatora PID, pełnił sterownik PLC, a sterowanie oraz akwizycje danych wykonywane były przez komputer. Cały układ dopełniał model matematyczny wysięgnika, który w pierwszej kolejności obliczał jaki ruch powinien wykonać dźwig, a dopiero później przesyłał te informacje do jednostki sterującej, która wykonywała ruch obrotowy w podstawie lub/oraz zmieniała kąt nachylenia wysięgnika, i wprowadzał korekty w odniesieniu do odczytów z układu pomiarowego.

Prof. Andrzej Maczyński w swojej pracy [4] również opisał metody stabilizacji ładunku. Jako jeden z celów, chciał opracować metodę sterowania ruchem obrotowym żurawi zapewniającą minimalizację końcowych wahań ładunku. Rozszerzył jednak zagadnienie o omówienie tego sterowania dla różnych konstrukcji, w tym żurawi samojezdnych małych, średnich oraz typu offshore. Drugim celem było przedstawienie koncepcji stabilizacji ładunku w żurawiach posadowionych na ruchomej platformie. W pracy tej została zaproponowana koncepcja wykonania mapy

bazowych funkcji obrotu, czyli zapamiętania parametrów ruchu dźwigu dla wybranych (najczęściej wykorzystywanych) kątów ruchu, a dla pozostałych obliczana na bieżąco. Do weryfikacji eksperymentalnej zastosował silnik z wbudowanymi hallotronowymi czujnikami położenia wirnika oraz fizyczny model wysięgnika. Przebieg trajektorii rejestrowano za pomocą aparatu cyfrowego, którym wykonywano zdjęcia w czasie 8s. Zarejestrowano na nich trajektorię czerwonej diody zamocowanej na środku ładunku. Badania zostały wykonane dla konkretnych przypadków. Autor książki, doszedł do wniosków, że w przypadku sterowania osiami obrotu, można znacznie zminimalizować wahania ładunku w kierunku stycznym, natomiast wahania w kierunku promieniowym nadal są wyraźne. Zaproponowane zostało zastosowanie dodatkowego układu regulacji, umiejscowionego na końcu wysięgnika, który byłby sztywny i mógł przemieszczać linę w kierunku stycznym i promieniowym.

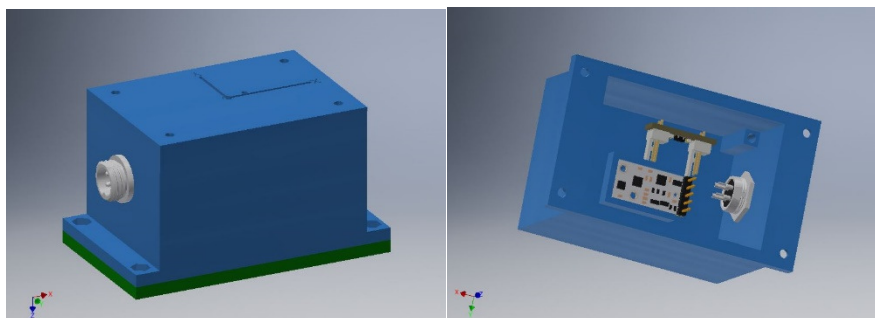
Tai-Yen Thomas Kuo oraz Shih-Chung Jessy Kang z Narodowego Uniwersytetu w Tajwanie, w swoim artykule [6], rozpatrywali to samo zagadnienie, jednak ich układem pomiarowym był system wizyjny. Jako układ wykonawczy wykorzystano robota przemysłowego o 6-ciu stopniach swobody. Każdy dźwig ma na linie zamocowane zawiesie z hakiem, a dopiero na nim zawieszony jest ładunek. Autorzy artykułu przyjęli do badań uproszczony model w postaci podwójnego wahadła. Wszystkie funkcje sterowania prędkościami i przyspieszeniami, oparli o obliczenia trygonometryczne. Wykorzystali oni jednak tylko dwa stopnie swobody robota, obrotu względem pierwszej osi, czyli ruchu po okręgu oraz obrotu ostatniej osi do zmiany wysokości zawieszono ładunku.

Wszystkie wyżej przytoczone przykłady badań zakończyły się sukcesem i znaczną minimalizacją wahań ładunków. Można oczywiście znaleźć wiele innych rozwiązań np. firm zajmujących się tą tematyką zawodowo, czy amatorskich projektów. Jest jednak pewne, że temat ten jest cały czas aktualny i udoskonalany.

## 2. Układ pomiarowy

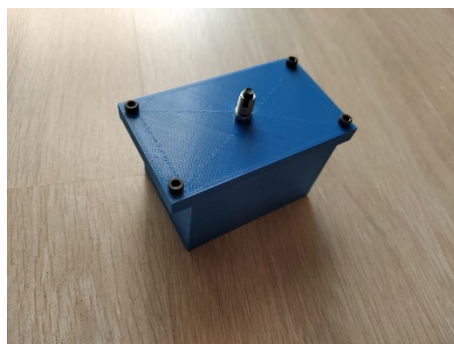
Projekt zakładał wykonanie układu pomiarowego w oparciu o akcelerometr, żyroskop, barometr – Pololu AltIMU-10 5V oraz płytke Arduino Uno, który będzie w stanie w czasie rzeczywistym mierzyć wychylenia promieniowe oraz styczne ładunku i wysyłać je do regulatora.

Cały układ zasilany był napięciem 24V DC z zasilacza. Arduino Uno znajdował się poza ramieniem robota, natomiast czujnik wraz ze stabilizatorem napięcia w obudowie, został zawieszony na ramieniu robota w miejsce ładunku. Napięcie zasilania było stabilizowane przez stabilizator liniowy L7805CV. Przewody sygnałowe oraz zasilające znajdowały się w kablu czterożyłowym i łączyły Arduino Uno z czujnikiem AltIMU-10 5V zawieszonym na robocie w wydrukowanej w 3D obudowie.



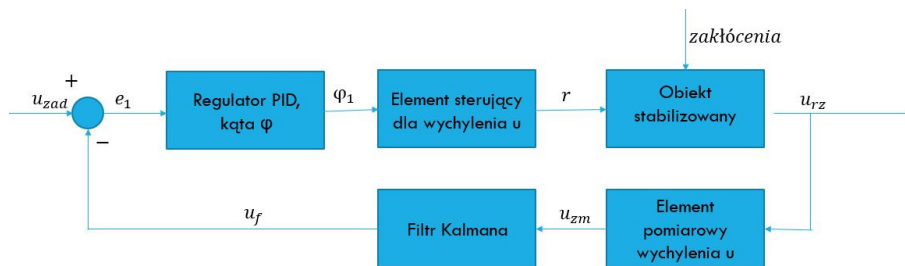
*Rysunek 1. Projekt obudowy układu pomiarowego*

Obudowa układu pomiarowego została zaprojektowana w oprogramowaniu Autodesk Inventor (rys. 1) i wydrukowana na drukarce 3D, Creality CR-10S z materiału PLA (rys. 2). Dokładnie na środku obudowy znajduje się środek układu współrzędnych odbieranych przez akcelerometr.

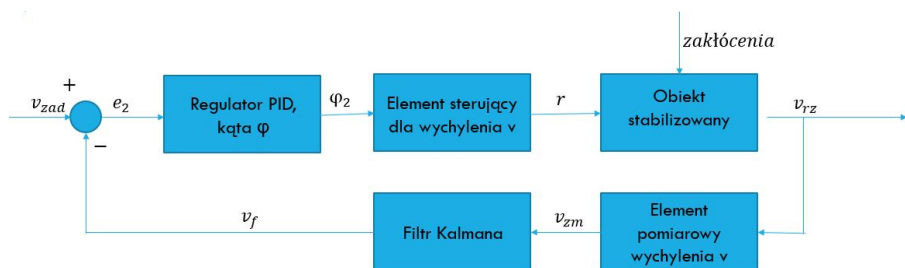


*Rysunek 2. Wydrukowana obudowa układu pomiarowego [opracowanie własne]*

System pomiarowy wykorzystuje układ Pololu AltIMU-10, który jest czujnikiem do pomiaru przyspieszenia, pola magnetycznego, prędkości kątowej oraz wysokości. Jest połączeniem 3-osiowego akcelerometru i żyroskopu LSM6DS33, magnetometru LIS3MDL i barometru LPS25H. Komunikacja pomiędzy czujnikiem, a Arduino, następuje poprzez magistralę I<sup>2</sup>C. Program realizowany przez Arduino Uno, ma za zadanie odczyt wartości przyspieszenia na poszczególnych osiach akcelerometru, a następnie przeliczanie ich na kąty wychylenia zawieszono ładunku. Założono, że do badań układ pomiarowy będzie pełnił rolę ładunku. Schemat blokowy przedstawiający pracę układu dla dwóch osi przedstawiają schematy rys. 3 i 4.



Rysunek 3. Schemat blokowy układu pomiarowego dla wychylenia  $u$ , tj. promieniowego [opracowanie własne]



Rysunek 4. Schemat blokowy układu pomiarowego dla wychylenia  $v$ , tj. stycznego [opracowanie własne]

Głównym zadaniem programu układu pomiarowego jest obsługa akcelerometru i żyroskopu, które mierzą kąty pochylenia względem osi X i Y oraz rotację względem osi Z. Akcelerometr przesyła wartości przyspieszenia ziemskiego względem poszczególnych osi w zakresie od -32766 do 32766. Do podania konkretnej wartości kąta nachylenia niezbędna jest konwersja tej wartości.

Akcelerometr znajdujący się na płycie Pololu AltIMU wyposażony jest już w filtry aktywne, niwelujące zakłócenia pomiarów. Jednak w trakcie pracy czujnika, nadal występują odchylenia w postaci pojedynczych skoków napięcia. W celu wygładzenia odczytów zastosowano filtr Kalmana.

Filtr Kalmana (KF) jest obserwatorem stanu minimalizującym średniokwadratowy błąd estymacji. Oznacza to, że algorytm na podstawie pomiarów wejścia i wyjścia obiektu szacuje jego wewnętrzny stan i oszacowuje jego wyszereowaną wartość.

Oryginalnie filtr Kalmana jest przeznaczony do pracy z układami liniowymi, jednak po niewielkich modyfikacjach jest możliwa również praca z układami niestacjonarnymi (których model zmienia się w czasie) i nieliniowymi. KF dla układów nieliniowych nazywany jest Rozszerzonym Filtrem Kalmana (EKF - Extended Kalman Filter). Rozpatrywany proces można przedstawić za pomocą dyskretno czasowego modelu w przestrzeni stanu [14]:

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + v(t) \tag{1}$$

$$y(t) = Cx(t) + w(t) \tag{2}$$

$x(t)$  oznacza stan w chwili czasu  $t = \{0, 1, \dots\}$ ,  $y(t)$  wyjście układu,  $A$  macierz stanu,  $B$  macierz wejścia,  $C$  macierz wyjścia. Symbole  $v(t)$  i  $w(t)$  oznaczają szum procesowy (szum tworzący) i szum pomiarowy.

Są to wzajemnie niezależne realizacje białego szumu gaussowskiego o zerowej wartości oczekiwanej i znanych macierzach kowariancji  $V$  i  $W$ . Odzwzorowują one niedoskonałość przyjętego modelu oraz niedokładność aparatury pomiarowej [14]:

$$v(t) \sim N(0, V) \quad (3)$$

$$w(t) \sim N(0, W) \quad (4)$$

Stan początkowy  $x(0)$  jest realizacją gaussowskiej zmiennej losowej niezależnej od  $v(t)$  i  $w(t)$  o wartości oczekiwanej  $x_0$  i macierzy kowariancji  $P_0$  [14]:

$$x(0) \sim N(x_0, P_0) \quad (5)$$

Algorytm składa się z dwóch faz. Pierwsza nazywana jest aktualizacją czasu i polega na wyliczeniu jednokrokowej predykcji stanu, czyli estymaty *a priori*  $\hat{x}(t+1|t)$  i jej macierzy kowariancji  $P(t+1|t)$  [14]:

$$\hat{x}(t+1|t) = A\hat{x}(t|t) + Bu(t) \quad (6)$$

$$P(t+1|t) = AP(t|t)A^T + V \quad (7)$$

Później następuje zwiększenie czasu  $t \leftarrow t + 1$  i algorytm przechodzi do drugiej fazy, czyli aktualizacji pomiarów [14]:

$$\varepsilon(t) = y(t) - C\hat{x}(t|t-1) \quad (8)$$

$$S(t) = CP(t|t-1)C^T + W \quad (9)$$

$$K(t) = P(t|t-1)C^T S^{-1}(t) + W \quad (10)$$

$$\hat{x}(t|t) = \hat{x}(t|t-1) + K(t)\varepsilon(t) \quad (11)$$

$$P(t|t) = P(t|t-1) - K(t)S(t)K(t)^T \quad (12)$$

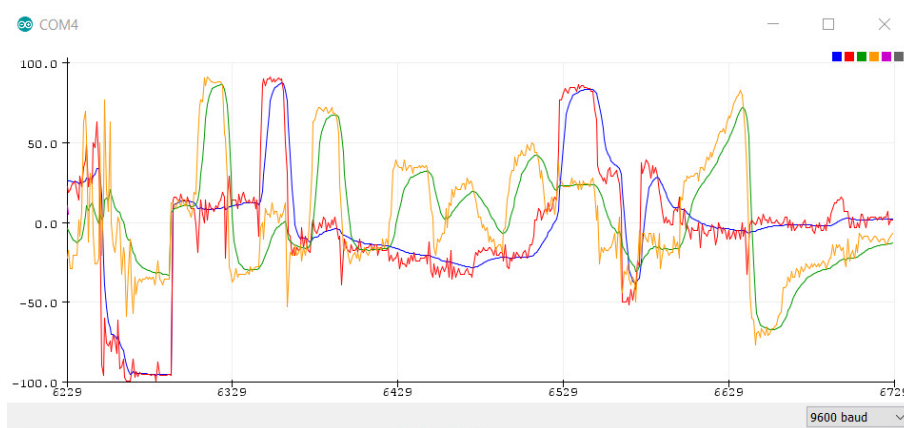
Wartość  $\varepsilon(t)$  jest różnicą pomiędzy najnowszym pomiarem  $y(t)$ , a wartością spodziewaną na podstawie aktualnego oszacowania stanu. Wartość ta nazywana jest innowacją, ponieważ przynosi nowe dane o procesie. Macierz  $K(t)$  nazywana jest wzmocnieniem Kalmana. Decyduje ona, jaki wpływ na estymatę stanu *a posteriori*  $\hat{x}(t|t)$  ma nowy pomiar, a jaki estymata *a priori*  $\hat{x}(t|t-1)$  [14].

Proces projektowania filtra jest bardzo skomplikowany i wymaga wielu obliczeń. Dlatego został on zaimplementowany w postaci gotowej biblioteki „SimpleKalman”. Na wejście do biblioteki należy zdefiniować trzy parametry, które są odpowiedzialne za:

- Niepewność pomiaru – ile oczekujemy, że nasze pomiary będą się różnić,
- Niepewność oszacowania – można go zainicjować z tą samą wartością co parametr nr 1, ponieważ funkcja sama go sobie dostosuje,

- Odchylenie procesu - zwykle niewielka liczba między 0,001 a 1 - jak szybko zmienia się filtrowana wartość. Zalecane 0,01, ale należy dostosować ten parametr to aplikacji.

Parametry filtra zostały dobrane doświadczalnie.



Rysunek 5. Sygnał z akcelerometru przed i po filtracji [opracowanie własne]

Pomimo zastosowania dodatkowego filtra dla odczytu z żyroskopu prędkość kątowa względem osi Z jest większa od zera, nawet gdy czujnik leży nieruchomo. Wykluczyło to możliwość odczytu kąta rotacji ładunku przez autorski układ pomiarowy.

Zrezygnowano z wykorzystania barometru, jako czujnika określającego wysokość na jakiej zawieszony jest ładunek z uwagi na krótki zasięg z robota. Barometr zwracał wartość z różnicami o nawet 10-15 cm, gdzie przy stałej długości 60 cm pręta, wykorzystanego zamiast liny, jest to bardzo duża różnica. Parametr ten jako dodatkowy można wykorzystać przy pełno gabarytowych dźwigach typu żuraw.

Przy próbie komunikacji Arduino Uno z podłączonym czujnikiem AltIMU oraz sterownikiem PLC, pracującym jako regulator, okazało się, że biblioteki do komunikacji Modbus RTU oraz czujnika, nie współpracują ze sobą. Spowodowało to konieczność rozszerzenia układu pomiarowego.

Ostateczny układ pomiarowy składał się z:

- płytki Arduino Uno,
- płytki Arduino Nano,
- czujnik AltIMU10-5V,
- dwa stabilizatory napięcia L7805CV,
- konwerter RS232-UART.

Po zmianie, w wydrukowanej obudowie znalazły się Arduino Nano, Czujnik AltIMU oraz stabilizator.

### 3. Badania doświadczalne

#### 3.1. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze (rys. 6), na którym przeprowadzano badania, składało się z:

- robota Kawasaki RS005L,
- sterownika Astraada RCC972,
- autorskiego układu pomiarowego,
- panelu sterującego, który został zrealizowany w postaci okna „Interface panel” na Teach Pendant’cie robota,
- wydrukowanego w technologii druku 3D pręta.

Układ pomiarowy został zawieszony na wydrukowanych prętach (rys. 7), które zostały zamocowane na dwóch łożyskach przegubowych firmy IGUS. Kinematycznie miały odpowiadać wahadłu drugiego stopnia, a w trakcie badań symulować bardzo sztywną linię oraz zawiesie.



Rysunek 6. Stanowisko badawcze  
[opracowanie własne]

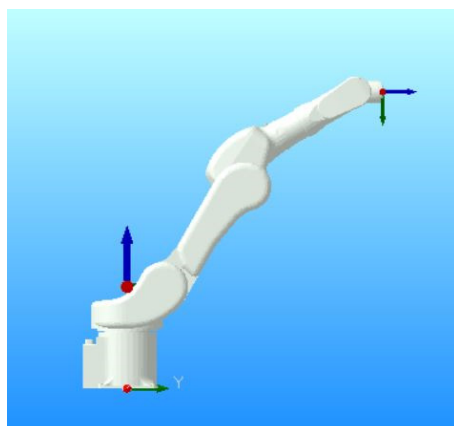


Rysunek 7. Wahadło drugiego stopnia z  
przykręconym czujnikiem TMM88-  
PCI090 [opracowanie własne]

#### 3.2. Realizacja badań

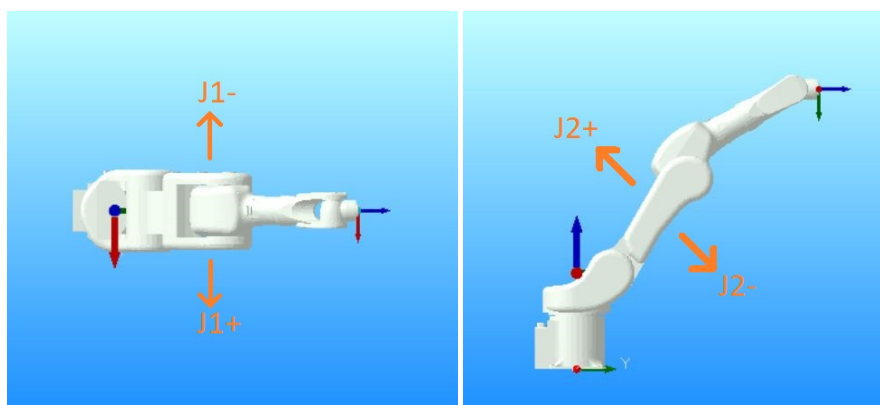
Badano ruch ramienia robota w osi J1 o zadany kąt, z zadaną prędkością i przyspieszeniem. W kolejnym kroku analizowano automatyczny ruch robota na pozycje wskazane przez regulator PID. Po każdym badaniu poprzez przycisk „HOME” robot powracał do pozycji domowej o współrzędnych:  $J1 = 0^\circ$ ,  $J2 = 40^\circ$ ,  $J3 = -20^\circ$ ,  $J4 = 0^\circ$ ,  $J5 = -30^\circ$ ,  $J6 = 0^\circ$ .





Rysunek 8. Robot w pozycji domowej [opracowanie własne]

Po wciśnięciu przycisku start, robot obracał się o zadany kąt i rozpoczynał automatyczną regulację. Regulacja pozycji ładunku odbywała się tylko poprzez ruchy osiami J1 oraz J2. Miało to za zadanie odwzorować obrotowy ruch żurawia i minimalizację wahań ładunku w kierunku stycznym oraz ruch odwijaka i minimalizację wahań ładunku w kierunku promieniowym.



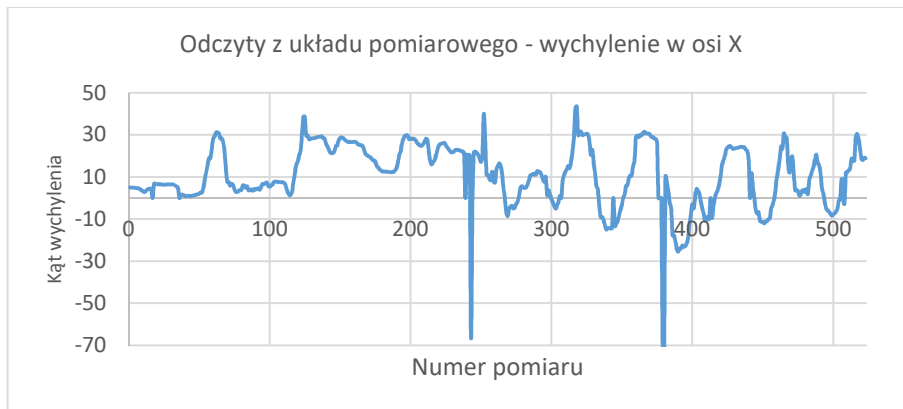
Rysunek 9. Kierunku ruchu robota dla osi J1 oraz J2 w czasie regulacji [opracowanie własne]

Przed rozpoczęciem faktycznych badań nad minimalizacją wahań ładunku, najważniejszym elementem był dobór nastaw regulatora PID. Nastawy regulatorów w sterowniku PLC najczęściej dobierane są poprzez autotuning. W omówionym przypadku nie przyniosło to jednak pozytywnych rezultatów. Po każdym strojeniu regulatora, nastawy były inne. Ruchy robota były takie jakich należałoby się spodziewać, ponieważ ramię robota cały czas poruszało się w górę lub w dół oraz w lewo lub w prawo, szukając pozycji. Jest to dokładne zachowanie regulatora ze źle dobranymi nastawami. Niestety nawet po postawieniu czujnika w nieruchomej pozycji, poza ramieniem robota, regulator nie potrafił znaleźć odpowiednich nastaw i ustabilizować swoje ruchy. Przykładowy pomiar dla kąta obrotu równego  $45^\circ$ ,

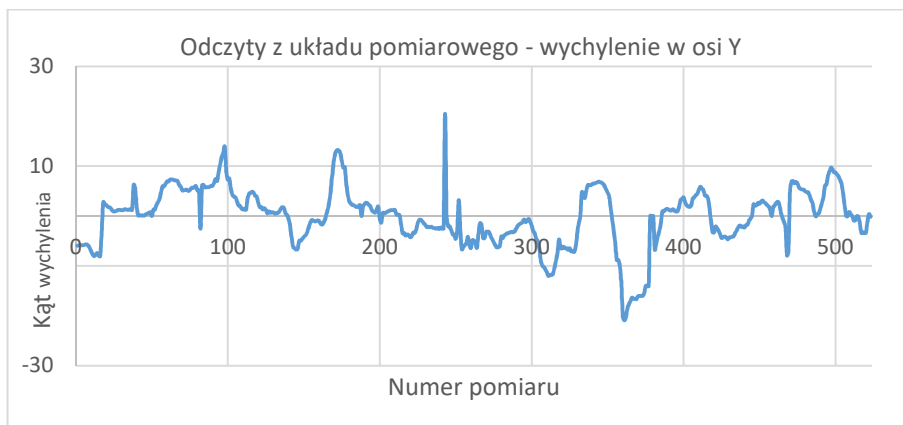
o prędkości 30% i przyspieszeniu 10% został przedstawiony na poniższych wykresach.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Date	Time	realKatX_done	realKatY_done	intPredkoscRobota	intPrzyspieszenieRobota	intKatRotacjiRobota
2	01/01/1996	00:12:34	5,01	-5,94	30	10	45
3	01/01/1996	00:12:34	4,92	-5,91	30	10	45
4	01/01/1996	00:12:34	4,92	-5,83	30	10	45
5	01/01/1996	00:12:34	4,88	-5,87	30	10	45
6	01/01/1996	00:12:35	4,73	-5,85	30	10	45
7	01/01/1996	00:12:35	4,66	-5,74	30	10	45
8	01/01/1996	00:12:35	4,63	-5,69	30	10	45
9	01/01/1996	00:12:35	4,2	-5,88	30	10	45
10	01/01/1996	00:12:35	3,72	-6,33	30	10	45
11	01/01/1996	00:12:35	3,27	-7,04	30	10	45
12	01/01/1996	00:12:35	2,85	-7,68	30	10	45
13	01/01/1996	00:12:35	3,14	-8,04	30	10	45
14	01/01/1996	00:12:35	3,89	-7,8	30	10	45
15	01/01/1996	00:12:35	4,36	-7,41	30	10	45

Rysunek 10. Arkusz zapisany na karcie SD z danymi z pomiaru – po formatowaniu [opracowanie własne]



Rysunek 11 Odczyty z układu pomiarowego - wychylenia w osi X (promieniowe) [opracowanie własne]



Rysunek 12. Odczyty z układu pomiarowego - wychylenia w osi Y (styczne) [opracowanie własne]

Dobór odpowiednich nastaw w tym przypadku jest o wiele bardziej skomplikowany z uwagi na czas wymiany danych. Cały opisany układ wykorzystuje trzy protokoły komunikacyjne, pomiędzy pięcioma urządzeniami, gdzie każde z nich wykonuje swoją pętlę programową. Dodatkowo na robocie Kawasaki wykonywane są dwa równoległe programy.

Pomimo dosyć szybkiej reakcji sterownika PLC na wysyłane dane od czujnika przez dwie płytki Arduino, gołym okiem widać opóźnienia w transmisji. Następna o wiele szybsza wymiana danych pomiędzy sterownikiem, a robotem może powodować nadpisywanie się tych samych wartości. Jednak największą komplikacją jest pętla programowa samego robota. Program główny wykonuje polecenie po poleceniu, jednak jego pętla zatrzymuje się w momencie instrukcji ruchu do czasu jej wykonania lub przerwania przez funkcję „ONP”, a dopiero po niej odczytywana jest aktualna pozycja robota. Podprogram wykonywany jest cały czas z dużo większą częstotliwością, a to w nim zawarta jest najważniejsza część, czyli wysyłanie i odbieranie pozycji kątowych osi.

Pomimo wielu prób doboru nastaw nie udało się dobrać ich tak, aby robot osiągnął stan ustalony. Jego pozycje cały czas zmieniały się i były bardzo rozbieżne od poprzednich. W niektórych przypadkach dochodziło nawet do przeregulowania. Postanowiono zakończyć badania na tym etapie.

#### 4. Podsumowanie

Układ pomiarowy bez problemów był w stanie odczytać wychylenia nawet o  $0,01^\circ$  lub po przeliczeniu na zrzutowaną płaszczyznę o 0,01 mm. Analizując problem wychylenia ładunku tylko w dwóch osiach, układ ten jest w stanie zrealizować swoje zadanie. Niestety nawet po zastosowaniu filtrów przy odczytywaniu prędkości kątowej występowały szумы, które uniemożliwiały wykonanie dokładnych obliczeń kąta obrotu, o jaki porusza się układ pomiarowy względem osi Z. Inklinometr nie bierze także pod uwagę drgań ładunku w trakcie jego ruchu, a na które układ AltIMU reagował. Dodatkowo należy zabrać pod uwagę, że są to elementy elektroniki hobbyistycznej i niekoniecznie sprawdziłyby się w warunkach przemysłowych. Układ pomiarowy komunikował się ze sterownikiem PLC Astraada RCC972 poprzez protokół Modbus RTU, dzięki konwerterowi RS232-UART. Sterownik pełnił rolę regulatora PID, a także odpowiedzialny był za akwizycję danych i kolejną komunikację z układem sterowania, czyli robotem Kawasaki. Sterownik został ten wybrany z uwagi na niski koszt oraz obsługę protokołów komunikacyjnych Modbus RTU oraz EtherNet/IP.

#### LITERATURA

1. HONCZARENKO J.: Roboty przemysłowe: Budowa i zastosowanie, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004, ISBN 83-204-2929-3, str. 28-53, 117-118, 152-163, 188-190
2. KŁOSIŃSKI J: Sterowanie ruchami roboczymi żurawi samojezdnych zapewniające pozycjonowanie przenoszonego ładunku, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej filii w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2000

3. KOPIEŁOWICZ A. P.: Dobór elementów regulatorów automatycznych, metody obliczeń, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1960, str. 81-85
4. MACZYŃSKI A.: Pozycjonowanie i stabilizacja położenia ładunku żurawi wyciągarkowych, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2005
5. MACZYŃSKI A.: Sterowniki programowalne PLC, Budowa systemu i podstawy programowania, Astor, Kraków, ISBN 83-915620-6-9, str. 19-35
6. KANG SH-CH. J., KUO T-Y. T.: Control of fast crane operation, *Automation in Construction* 42, 2014, str. 25-35
7. ZDANOWICZ R.: Podstawy robotyki, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012, ISBN 978-83-7335-922,2, str. 30, 47, 110-111
8. Serwis internetowy: [www.robotyka.com](http://www.robotyka.com), dostęp dnia 08.03.2020
9. Artykuł internetowy: [www.iautomatyka.pl/dynamiczne-czujniki-nachylenia-precyzyjny-i-pewny-pomiar-w-6-stopniach-swobody/](http://www.iautomatyka.pl/dynamiczne-czujniki-nachylenia-precyzyjny-i-pewny-pomiar-w-6-stopniach-swobody/), dostęp dnia 08.03.2020
10. Artykuł internetowy: <https://www.ni.com/pl-pl/innovations/white-papers/13/the-basics-of-canopen.html>, dostęp dnia 09.03.2020
11. Artykuł internetowy: <https://www.astor.com.pl/poradnikautomatyka/ethernet-ip-w-robotach-kawasaki/>, dostęp 09.03.2020
12. Artykuł internetowy: <https://automatykab2b.pl/temat-miesiaca/49197-komunikacja-w-systemach-automatyki-przemyslowej-ethernet-vs-fieldbus>, dostęp 09.03.2020
13. Artykuł internetowy: <https://forbot.pl/blog/filtr-kalmana-teorii-praktyki-1-id2855>, dostęp 13.02.2020
14. Artykuł internetowy: <https://www.instructables.com/id/Accelerometer-Gyro-Tutorial/>, dostęp 13.02.2020
15. Artykuł internetowy: <https://starter-kit.nettigo.pl/2012/02/akcelerometry-zyroskopy-i-kompasy-czyli-badanie-polozenia-z-arduino-cz-1/>, dostęp 13.02.2020
16. Artykuł internetowy: <https://elektronikab2b.pl/technika/12098-zyroskopy-i-akcelerometry-mems-w-elektronice-uzytkowej>, dostęp 13.02.2020
17. Instrukcja obsługi: User's manual, DC20XX, ET20XX, ECC2100, wydanie 11, Astor, Kraków 2015
18. Instrukcja obsługi: TMS/TMM88, TMS/TMM61, Inclination sensors with CANopen interface, SICK
19. Materiały wykładowe z przedmiotu Systemy Czasu Rzeczywistego – Protokoły komunikacyjne w sieci Ethernet, ATH 2014 przygotowanie: Ewa Bebek, Marcin Sidzina
20. MARKIEFKA M.: Projekt układu sterowania minimalizującego w czasie rzeczywistym wahań ładunku, praca dyplomowa, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2020.