

Robert Kuck\*, Mariusz Pauluk\*

## Konstrukcja regulatora rozmytego w środowisku labVIEW dla suwnicy 3D

### 1. Wstęp

Zadaniem zaprojektowanego regulatora rozmytego jest przenoszenie ładunku pomiędzy dwoma dowolnymi punktami w przestrzeni roboczej suwnicy w taki sposób, aby zminimalizować wahania ciężarka powstałe podczas ruchu, lub wahania wygenerowane pod wpływem zewnętrznych zakłóceń [1, 3, 6]. Regulator zrealizowano używając narzędzi środowiska LabVIEW – *Fuzzy Logic Toolkit* elementów *PID Control Toolkit* [10].

Do syntezy regulatora wybrano klasyczny regulator rozmyty Mamdaniego [4, 8]. Przyjęto rozseparowaną strukturę regulatora, którą tworzą trzy rozmyte regulatory położenia typu P, po jednym dla osi:  $x$ ,  $y$  i  $z$ , oraz dwa regulatory rozmyte typu PD minimalizujące odchylenia ładunku od pozycji pionowej.

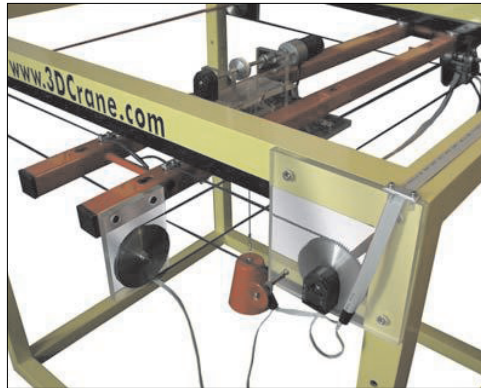
### 2. Stanowisko laboratoryjne

Rysunek 1 przedstawia laboratoryjny model suwnicy [9], dla której skonstruowano w pakiecie LabVIEW regulator rozmyty [2, 10]. Suwnica przemieszcza wózek wraz z podwieszonym na lince ładunkiem w płaszczyźnie  $XY$ . Ładunek może być podnoszony lub opuszczany.

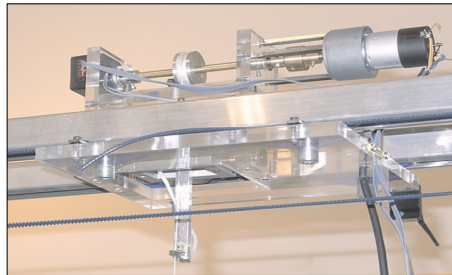
Przemieszczenie ładunku, a także odchylenie kątowe ładunku od pionu mierzone jest za pomocą pięciu układów formujących impulsy cyfrowe na podstawie ruchu tarcz enkoderych. Położenie ładunku opisywane jest więc za pomocą pięciu zmiennych:  $x_w$  – położenia wózka (rys. 2) wzdłuż osi  $x$ ,  $y_w$  – położenia wózka wzdłuż osi  $y$ ,  $r$  – długości linki,  $\alpha$  – odchylenia ciężarka od pionu w płaszczyźnie  $xz$  i  $\beta$  – odchylenia ciężarka od pionu w płaszczyźnie  $yz$ . Suwnica napędzana jest trzema silnikami prądu stałego. Długość, wysokość i szerokość ramy suwnicy wynosi 1 m. Masa ciężarka wynosi 1 kg.

---

\* Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie



Rys. 1. Model mechaniczny suwnicy



Rys. 2. Wózek z zamontowanym układem do pomiaru kątów wychYLENIA ciężarka

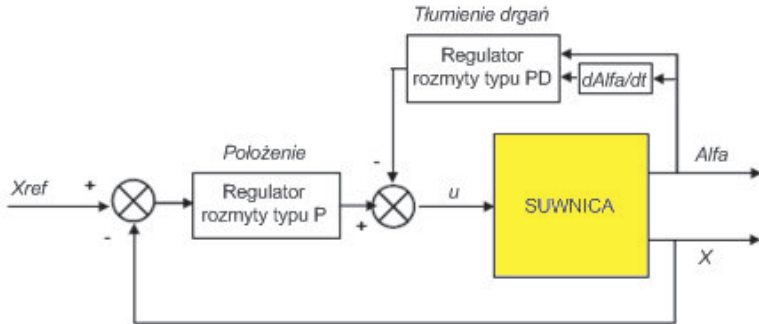
Celem sterowania suwnicą jest przeniesienie podwieszonego na linie ładunku z wybranego punktu początkowego do zadanego punktu końcowego w taki sposób, aby transport odbywał się szybko i bezkolizyjnie. Ruch ładunku powinien być także kontrolowany pod względem jego odchylenia od pionu.

### 3. Układ regulacji

Zamieszczony na rysunku 3 schemat blokowy przedstawia sposób sterowania suwnicą, gdy ciężarek przemieszczany jest wzdłuż osi  $x$ . Analogicznie skonstruowany jest regulator dla ruchu suwnicy wzdłuż osi  $y$ .

Zadania przemieszczania wózka suwnicy wzdłuż osi  $x$  (regulator rozmyty P) oraz tłumienia odchylenia od pionu ciężarka w płaszczyźnie  $xz$  (regulator rozmyty PD) realizowane są za pomocą tego samego sterowania. W trakcie transportu zdarza się, że oba układy regulacji wymagają przeciwstawnych sygnałów sterujących. Przyjęto, że priorytetowym zadaniem jest stabilizacja położenia kąтового ładunku. Wyższy priorytet dla regulatora PD zrealizowano przez zastosowanie większego wzmocnienia dla sterowania wyliczanego przez ten regulator

w stosunku do sterowania wyliczanego przez regulator rozmyty P. Następnie, sterowania wyliczone przez oba regulatory wprowadza się na sumator i z sumatora jako wypadkowe sterowanie podaje się na wejście sterujące silnikiem (sygnał  $u$ , rys. 3).



Rys. 3. Układ regulacji położenia ciężarka wzdłuż osi  $x$

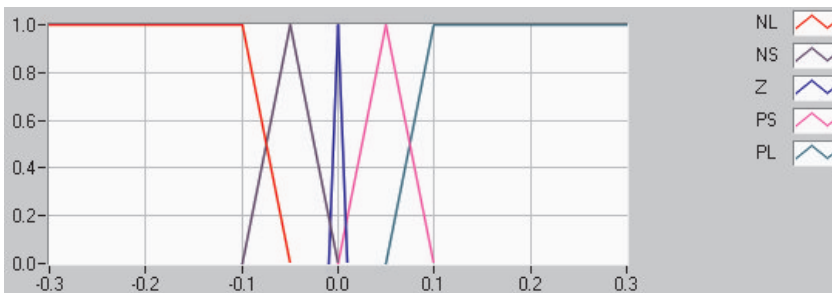
## 4. Konstrukcja regulatora rozmytego

### 4.1. Regulacja rozmyta typu P

W konstrukcji regulatorów rozmytych typu P przyjęto następujące nazwy zbiorów rozmytych:

- NL (*Negative Large*) – ujemny duży,
- NS (*Negative Small*) – ujemny mały,
- Z (*Zero*) – zero,
- PS (*Positive Small*) – dodatni mały,
- PL (*Positive Large*) – dodatni duży.

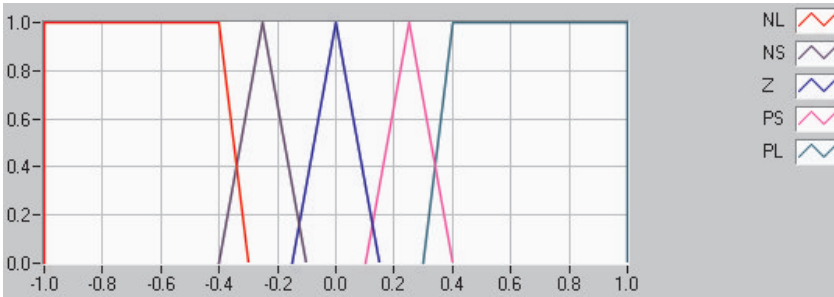
Rysunki 4 i 5 przedstawiają graficzną reprezentację zdefiniowanych funkcji przynależności sterujących przemieszczaniem się wózka suwnicy wzdłuż osi  $x$  i  $y$  dla regulatorów typu P.



Rys. 4. Graficzna reprezentacja funkcji przynależności dla sygnałów wejściowych (błąd położenia) regulatora typu P – dla kierunków wzdłuż osi  $x$  i  $y$  z

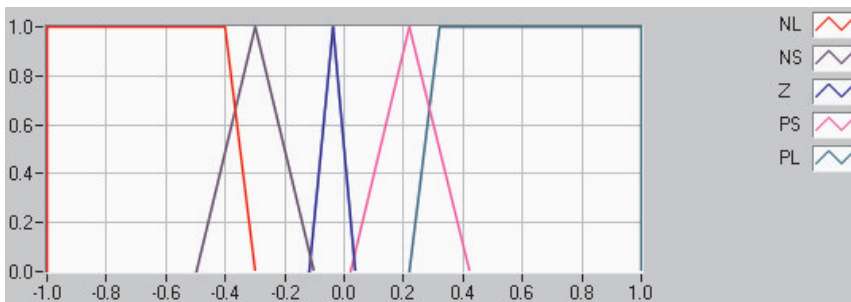
Oś  $x$  na rysunku 4 określa uchyb położenia wyrażony w metrach, a oś  $y$  reprezentuje stopień przynależności do zbioru rozmytego, gdzie wartość zero oznacza brak przynależności, a wartość 1 oznacza całkowitą przynależność. Wartość pośrednia z przedziału  $[0, 1]$  określa stopień przynależności do danego zbioru.

Oś  $x$  na rysunku 5 określa wartość sterowania z zakresu  $[-1, 1]$ , a oś  $y$  oznacza wartość rozmytą wyliczonego sterowania przez regulator.



**Rys. 5.** Graficzna reprezentacja funkcji przynależności dla sygnałów wyjściowych z regulatorów typu P dla kierunków wzdłuż osi  $x$  i  $y$

Dla regulatora typu P, sterującego wysokością zawieszenia ciężarka (oś  $z$ ), funkcje przynależności dla sygnału wejściowego zostały określone w taki sam sposób jak na rysunku 4. Ze względu na siłę przyciągania ziemskiego działającą na ciężarek, już niewielkie dodatnie sterowanie w osi  $z$  powoduje ruch ciężarka w dół. Z kolei, aby podnieść ciężarek, sterowanie w przeciwną stronę (ujemne) musi być większe co do bezwzględnej wartości niż poprzednio, gdyż działająca siła przyciągania działa w kierunku przeciwnym do siły sterującej. W związku z powyższym funkcje przynależności dla sygnału sterującego w osi  $z$  zostały nieznacznie przesunięte w lewo w stosunku do funkcji przynależności sterowań położeniem wózka (rys. 6).



**Rys. 6.** Graficzna reprezentacja funkcji przynależności dla sygnałów wyjściowych z regulatora typu P sterującego ruchem ciężarka w dół i w górę

Baza reguł dla wszystkich regulatorów typu P jest taka sama i przedstawia się następująco:

- |   |  |
|---|--|
| 1) <b>IF</b> (błąd położenia is <i>NL</i> ) | <b>THEN</b> (sterowanie is <i>NL</i> ) |
| 2) <b>IF</b> (błąd położenia is <i>NS</i> ) | <b>THEN</b> (sterowanie is <i>NS</i> ) |
| 3) <b>IF</b> (błąd położenia is <i>Z</i> )  | <b>THEN</b> (sterowanie is <i>Z</i> )  |
| 4) <b>IF</b> (błąd położenia is <i>PS</i> ) | <b>THEN</b> (sterowanie is <i>PS</i> ) |
| 5) <b>IF</b> (błąd położenia is <i>PL</i> ) | <b>THEN</b> (sterowanie is <i>PL</i> ) |

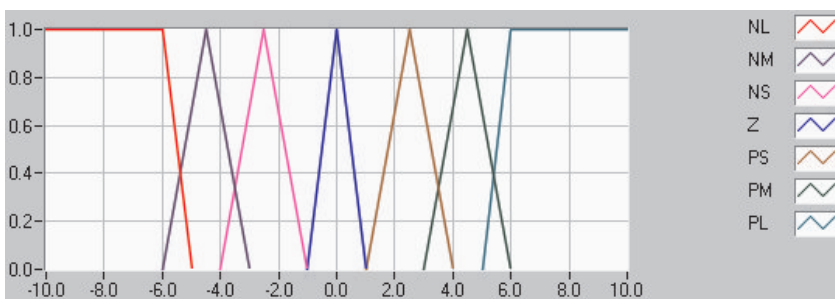
## 4.2. Regulacja rozmyta typu PD

Stabilizacja pionowej pozycji zawieszonoego na linie ładunku jest bardziej złożona od stabilizacji położenia wózka w wybranym punkcie mostu suwnicy. Do efektywnego i skutecznego sterowania wahającym się ciężarkiem podwieszonym punktowo do wózka suwnicy potrzebna jest nie tylko wartość uchybu kąowego odchylenia, ale także informacja o prędkości kątowej wahającego się ciężarka. Dlatego do stabilizacji pionowej pozycji ciężarka zastosowano regulację typu PD.

W konstrukcji regulatora zwiększon liczbę funkcji przynależności o cztery. Wprowadzono dodatkowo:

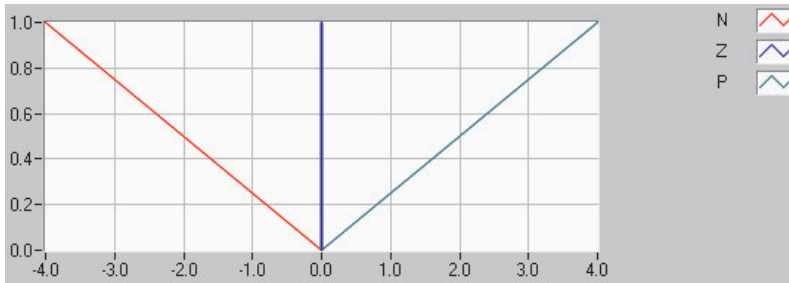
- |                               |                   |
|-------------------------------|-------------------|
| NM ( <i>Negative Medium</i> ) | – ujemny średni,  |
| PM ( <i>Positive Medium</i> ) | – dodatni średni, |
| N ( <i>Negative</i> )         | – ujemny          |
| P ( <i>Positive</i> )         | – dodatni         |

Wartością zadaną dla układu stabilizacji pozycji pionowej ciężarka jest wartość zero. Zatem, niezerowe wartości kątów:  $\alpha$  i  $\beta$  są jednocześnie błędem regulacji. Rysunki 7 i 8 przedstawiają graficzną reprezentację funkcji przynależności dla sygnałów wejściowych regulatora PD.



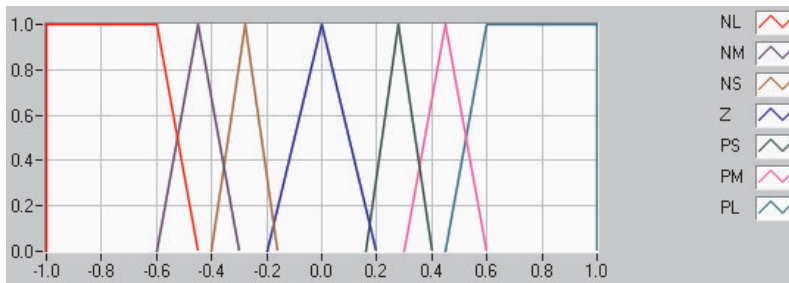
**Rys. 7.** Graficzna reprezentacja funkcji przynależności dla sygnałów wejściowych (błąd odchylenia kąowego) regulatora typu PD dla kątów  $\alpha$  i  $\beta$

Oś  $x$  w dla obu sygnałów wejściowych reprezentuje uchyb regulacji, a oś  $y$  stopień przynależności do zbioru rozmytego.



**Rys. 8.** Graficzna reprezentacja funkcji przynależności dla sygnałów wejściowych (błędu prędkości kątowej) regulatora typu PD dla kątów  $\alpha$  i  $\beta$

Proces stabilizacji położenia ciężarka w pionowej pozycji wymaga większej precyzji niż regulacja położenia wózka, dlatego liczba funkcji przynależności dla sygnału sterowania regulatora została zwiększona (rys. 9). Pozwala to precyzyjniej określić zachowanie regulatora przez zdefiniowanie większej liczby reguł.



**Rys. 9.** Graficzna reprezentacja funkcji przynależności dla sygnałów wyjściowych z regulatora typu PD stabilizującego pionowe położenie ciężarka

Regulatory tłumiące amplitudę wahań wyznaczają sterowanie na podstawie dwóch sygnałów wejściowych: kąta wychylenia oraz pochodnej kąta wychylenia. Tabela 1 przedstawia bazę zdefiniowanych reguł dla regulatora PD.

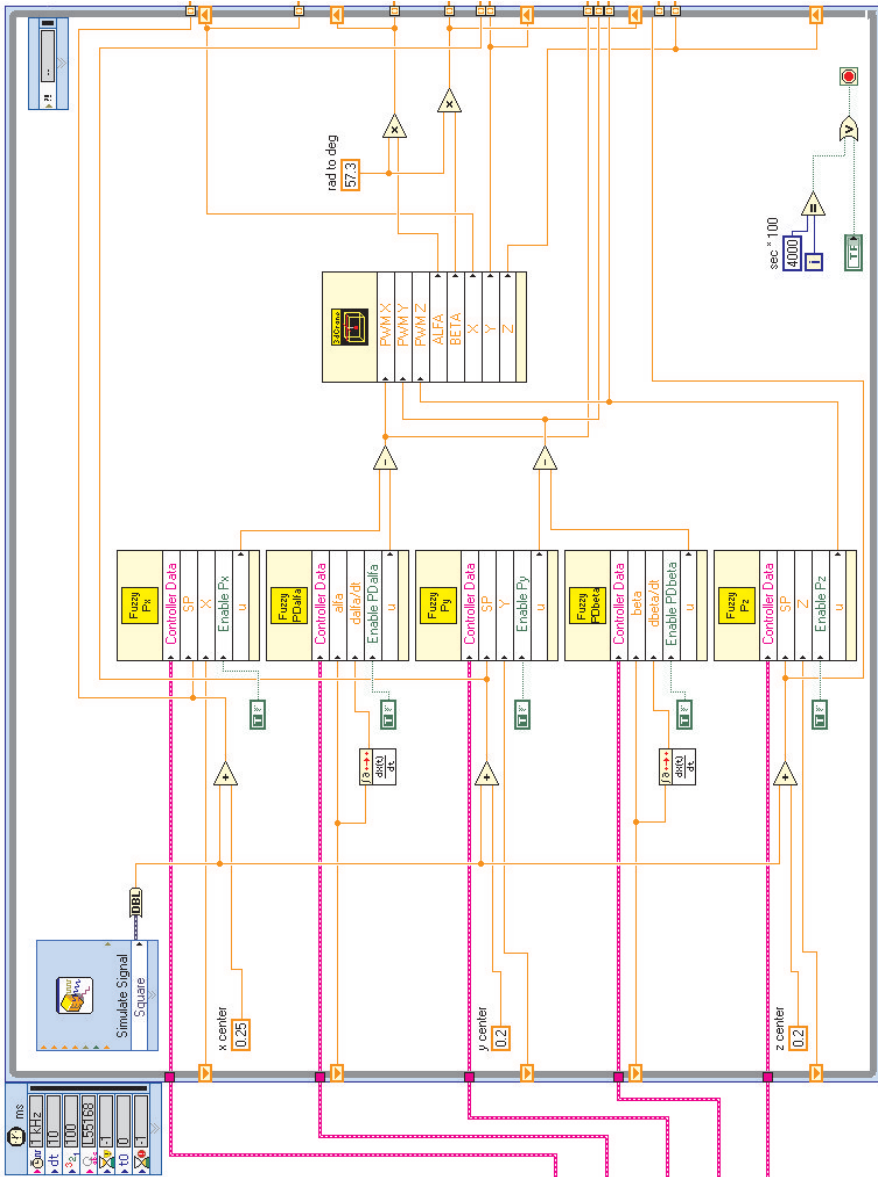
**Tabela 1**  
Baza reguł regulatora rozmytego PD

		<i>Kąt</i>						
		<i>PL</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>Z</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>	<i>NL</i>
<i>Pochodna kąta</i>	<i>P</i>	<i>NL</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PL</i>
	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>
	<i>N</i>	<i>NL</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PL</i>

Reguły na podstawie tabeli 1 należy odczytywać według szablonu:

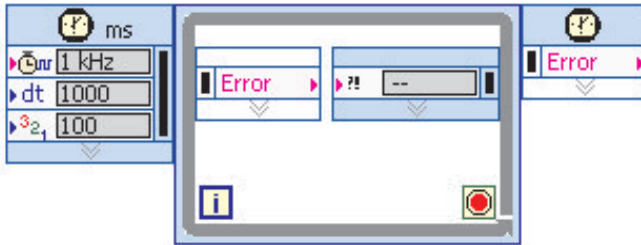
**JEŻELI** *Pochodna\_kąta* jest <zbiór rozmyty> **I** *kąt* jest <zbiór rozmyty>  
**TO** sterowanie jest < zbiór rozmyty>

Pełny rozmyty układ regulacji suwnicy został zrealizowany przy użyciu narzędzia *Fuzzy Logic Controller Design*, wchodzącego w skład *Fuzzy Logic Toolkit* [10]. Z regulatora można korzystać przy pomocy opisanego panelu kontrolnego lub niezależnie od niego poprzez osobną aplikację *controller.vi*, której fragment diagramu, realizujący obliczanie sterowania przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Fragment diagramu realizujący regulator rozmyty dla suwnicy

Aby zapewnić warunki sterowania w czasie rzeczywistym [5, 7] wykorzystano pętlę LabVIEW – *Timed Loop*, którą stosuje się w celu precyzyjnego zadawania okresu powtórzeń wybranego fragmentu programu, a także do ustalania priorytetów zadań (rys. 11).



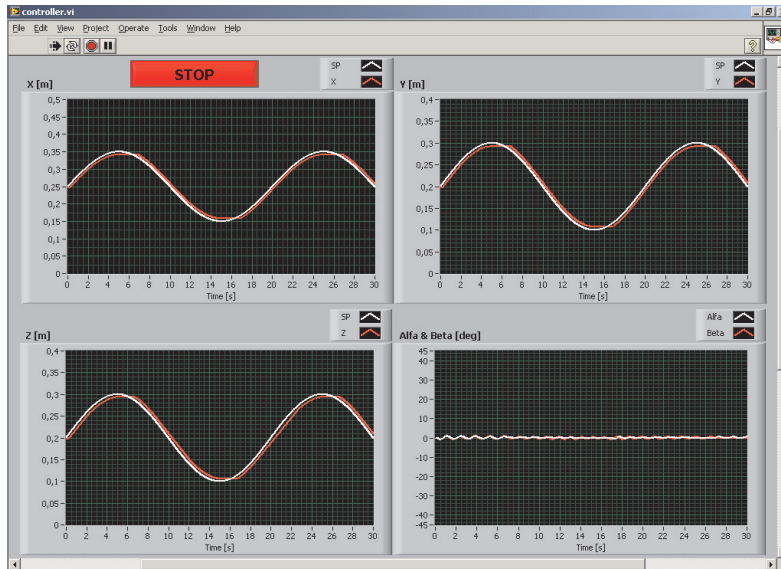
Rys. 11. Struktura *Timed Loop*

Pętlę *Timed Loop* tak skonfigurowano, aby nowa wartość sterowania wyliczana była 100 razy na sekundę, w równych odstępach czasu wynoszących 10 milisekund (rys. 10). W pętli umieszczono driver suwnicy. Do wejść drivera podłączono sygnały sterujące dla każdej z trzech osi urządzenia, które wyliczane są przez pięć opisanych wcześniej regulatorów rozmytych: trzy typu P oraz dwa typu PD. Sterowanie suwnicą odbywa się w pętli zamkniętej. Wartości enkoderów położenia i wychylenia kąтового, odczytane w jednej iteracji pętli, są za pomocą rejestru przesuwającego przekazywane w następnej iteracji na początek pętli. Na podstawie tych wartości generowane jest sterowanie. Dwa regulatory położenia wózka i mostu oraz regulator położenia pionowego ciężarka reprezentowane są w diagramie odpowiednio przez funkcje *Fuzzy Px*, *Fuzzy Py* oraz *Fuzzy Pz*. Każda z funkcji posiada cztery wejścia i jedno wyjście z wyliczonym sterowaniem. Do wejścia *Controller Data* podpięty jest sygnał zawierający odczytane we wcześniejszej części programu dane regulatora, zawierające jego funkcje przynależności oraz bazę reguł. Wejście *SP* służy do przekazywania wartości zadanej, natomiast *X* (*Y* lub *Z*) – aktualnej wartości położenia ciężarka. Zmienna logiczna podpięta do wejścia *Enable* funkcji pozwala na włączenie lub wyłączenie regulatora. W przypadku wartości *F* (*False*) wartość sterowania wynosi zero. Regulatory tłumiące amplitudę wychylenia kąтового ładunku:  $\alpha$  (*PDalpha*) i  $\beta$  (*PDbeta*) posiadają dodatkowe wejście *dalpha/dt* (*dbeta/dt*), do których wprowadzany jest sygnał prędkości kąтовой ciężarka.

Zmienne *x center*, *y center* i *z center* służą do przeniesienia punktu zerowego (0, 0, 0) do środka przestrzeni roboczej suwnicy, natomiast *rad to deg* służą do konwersji wartości kątów z miary łukowej na stopnie. Funkcja *Simulate Signal* wykorzystywana jest do generowania wybranego przebiegu wartości zadanej.

Aplikacja *controller.vi* (rys. 12) może zostać wykorzystana jako baza do eksperymentów z innymi typami regulatorów. W tym celu regulatory rozmyte należy zastąpić innymi oraz w zależności od potrzeb odpowiednio zmodyfikować połączenia sygnałów wejściowych i wyjściowych.

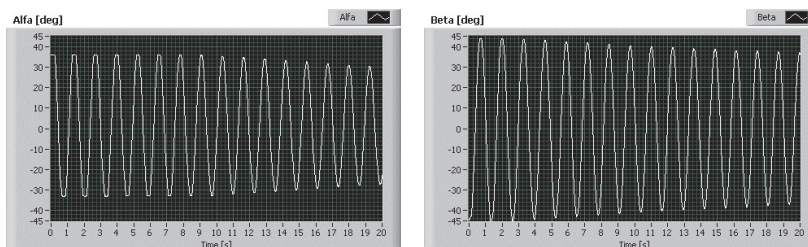


Rys. 12. Panel aplikacji *controller.vi*

## 5. Eksperymenty

### 5.1. Test regulatorów PD

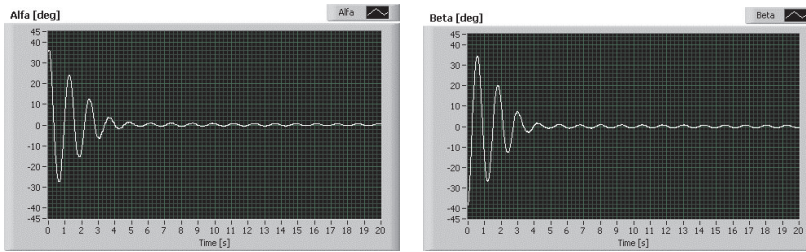
W pierwszym eksperymencie sprawdzono skuteczność działania regulatorów tłumiących amplitudę wahań ciężarka. Podczas testu regulatory położenia zostały wyłączone wskutek podania na ich wejścia *Enable* sygnału logicznego *False*. W pierwszym kroku także regulatory *PDalfa* i *PDbeta* zostały zdezaktywowane. Dzięki temu odczytano przebiegów drgań swobodnych ciężarka. Ciężarek wychylono o maksymalny, dopuszczalny konstrukcyjnie kąt, a następnie puszczono swobodnie. Zapamiętane przebiegi przedstawiono na wykresach (rys. 13).



Rys. 13. Wahania swobodne ciężarka

Następnie uaktywniono regulatory tłumiące amplitudę wahań ciężarka i powtórzono eksperyment. Po upływie ok. 5 sekund ciężarek został ustabilizowany – a amplituda oscylacji

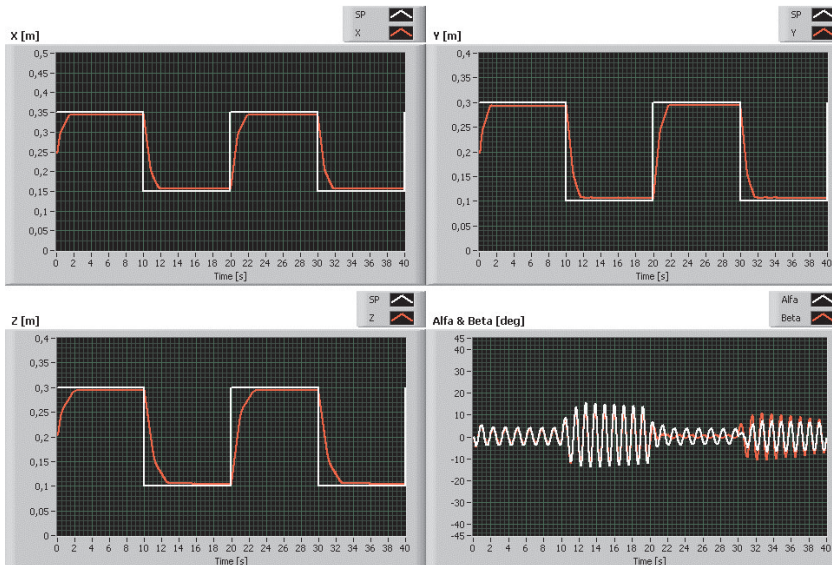
zmniejszyła się do wartości mniejszej niż jeden stopień. Wyniki drugiego eksperymentu przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14. Tłumienie amplitudy wahań

## 5.2. Test regulatorów P

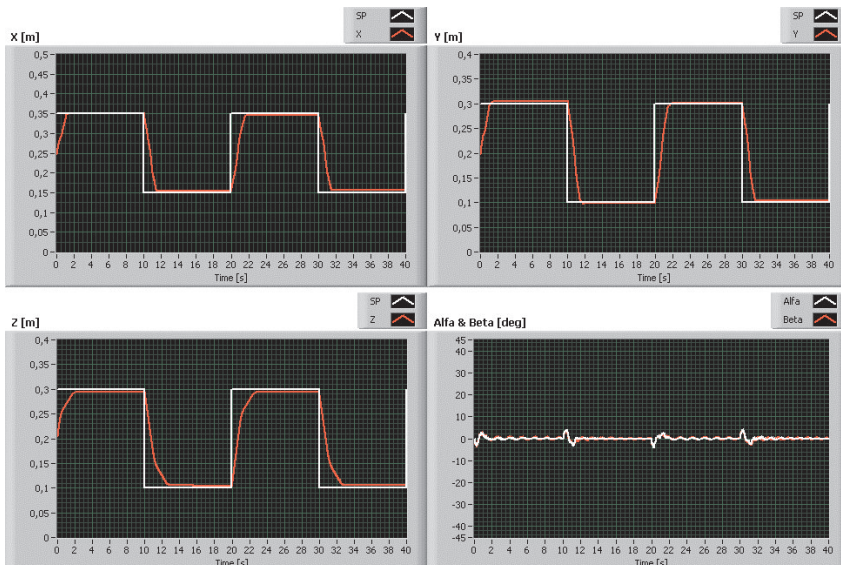
W kolejnym eksperymencie włączono regulatory położenia i wyłączyło regulatory PD. Wartości zadane położenia dla wszystkich trzech regulatorów określono jako sygnały prostokątne generowane za pomocą funkcji *Simulate Signal*. W panelu LabVIEW obserwowano nadążanie położenia wózka i mostu oraz wysokości położenia ciężarka za wartościami zadanymi. Równocześnie obserwowano pasożytnicze wahania ciężarka. Trajektorie położenia zebrane podczas eksperymentu przedstawia rysunku 15. Zgodnie z oczekiwaniem trajektorie rzeczywistych położenia nadążały za sygnałami wartości zadanych położenia. Podczas eksperymentu amplituda drgań ciężarka nie przekraczała 18 stopni.



Rys. 15. Regulacja (nadążna) położenia wózka i mostu i wysokości ciężarka

### 5.3. Test regulatorów P i PD

W kolejnym eksperymencie uaktywniono wszystkie regulatory. Trajektorie położenia pokazano na rysunku 16. Podobnie jak w poprzednim eksperymencie, wartości zadane regulatorów P miały kształt fal prostokątnych. Szybkie zmiany wartości zadanych położenia wózka i mostu, które występują w 10., 20., oraz 30. sekundzie eksperymentu powodują pojawienie się niewielkich (o amplitudzie około 4 stopni) wahań ładunku, które następnie zostają wyłumione. Znając strukturę układu regulacji (rys. 3) oczekiwano, że włączenie regulatorów PD poprawi stabilizację położenia pionowego ciężarka kosztem jakości regulacji nadążnej typu P. W praktyce trudno dostrzec różnicę w jakości sterowania położeniem wózka i mostu (por. rys. 15 i 16). Wyraźna jest także, po porównaniu wyników obu eksperymentów, różnica w jakości sterowania stabilizującego położenia ciężarka.



Rys. 16. Regulacja (nadążna) położenia wózka i mostu i wysokości ciężarka z aktywnym tłumieniem drgań ciężarka

## 6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane eksperymenty. Starano się je tak dobrać, aby otrzymane rezultaty ułatwiły ocenę skuteczności zaprojektowanych układów regulacji w możliwie szerokim zakresie wartości sygnałów wejściowych. Na podstawie wyników tych eksperymentów można stwierdzić, że algorytm działa poprawnie i steruje obiektem w sposób zgodny z oczekiwaniami. Pokazano również, że zastosowana idea sterowania rozmytego pozwala na szybkie i proste skonstruowanie efektywnie działającego regulatora. Odpowiednio dobierając

funkcje przynależności oraz bazy reguł, można uzyskać wartości sterowania dla wybranego obszaru przestrzeni stanów obiektu, tym samym zdefiniować pożądane zachowanie regulatora. Cecha ta jest istotną zaletą regulatorów rozmytych. Jednocześnie przyjęta rozseparowana struktura regulatora, z możliwością dowolnego załączania i wyłączania wchodzących w jego skład regulatorów, pozwala na obserwacje wpływu poszczególnych obwodów regulatora na zachowanie się systemu.

Pakiet LabVIEW okazał się pomocnym i praktycznym narzędziem w realizacji postawionego zadania. Jego możliwości pozwoliły w sposób efektywny i przejrzysty: zaimplementować zaprojektowany regulator, przystosować go do pracy w czasie rzeczywistym oraz przeanalizować zachowanie całego układu regulacji. Graficzne możliwości pakietu dają projektantowi swobodę w dostrojeniu układu regulacji.

## Literatura

- [1] Benhidjeb A., Gissing G.L., *Fuzzy control of an overhead crane performance comparison with classic control*. Control Eng. Practice, vol. 3, No. 12, Pergamon 1995, 1687–1696.
- [2] Bitter R., Mohiuddin T., Nawrocki M., *LabView advanced programming techniques*. CRC Press, 2006.
- [3] Derek L., Parker G.G., Driessen B., Robinett R.D., *Command Shaping Control of an Operator in the Loop Boom Crane*. Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania 1998.
- [4] Driankov D., Hellendorn H., Reinfrank M., *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer, New York 1995.
- [5] Grega W., *Metody i algorytmy sterowania cyfrowego w układach scentralizowanych i rozproszonych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004.
- [6] Pauluk M., *Regulator rozmyty jako przykład algorytmu odpornego*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 10, z. 1, 2006, 53.
- [7] Piątek P., *Wykrzystanie specjalizowanych architektur sprzętowych do realizacji krytycznych czasowo zadań sterowania*. Akademia Górniczo Hutnicza, Kraków 2007 (rozprawa doktorska).
- [8] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. PWN, Warszawa 1997.
- [9] [www.inteco.com.pl](http://www.inteco.com.pl), *3DCrane User's Manual*.
- [10] [www.ni.com/labview/manuals/](http://www.ni.com/labview/manuals/), *PID Control Toolset User Manual*, National Instruments 2001.