

Projekt układu regulacji i symulacja numeryczna pracy suwnicy bramowej

Rafał Mas¹, Arkadiusz Trąbka^{2,*}

¹ Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Polska, rafmas16@gmail.com

² Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Polska, atrabka@ubb.edu.pl

* Autor korespondencyjny, atrabka@ubb.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono model geometryczny oraz obliczeniowy suwnicy bramowej, opracowanie układu regulacji ruchami roboczymi suwnicy oraz analizę numeryczną przenoszenia ładunku według zadanych trajektorii ruchu. Poprawność pracy układu regulacji analizowano podczas przemieszczania ładunku z różnymi prędkościami wzdłuż zadanych trajektorii: prostoliniowej oraz krzywoliniowej.

Słowa kluczowe: Suwnica bramowa; model obliczeniowy; układ regulacji; trajektoria ruchu ładunku;

Design of a control system and numerical simulation of a gantry crane operation

Rafał Mas¹, Arkadiusz Trąbka^{2,*}

¹ University of Bielsko-Biala, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland, rafmas16@gmail.com

² University of Bielsko-Biala, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland, atrabka@ubb.edu.pl

* Corresponding author, atrabka@ubb.edu.pl

Abstract: A geometric and computational model of a gantry crane is presented, as well as the development of a control system for the crane's working movements and numerical analysis of a load transfer according to the given movement trajectories. The correctness of the control system operation was analyzed during load movement at various speeds along given straight and curvilinear trajectories.

Keywords: Gantry crane; computational model; control system; load movement trajectory;

1. Wprowadzenie

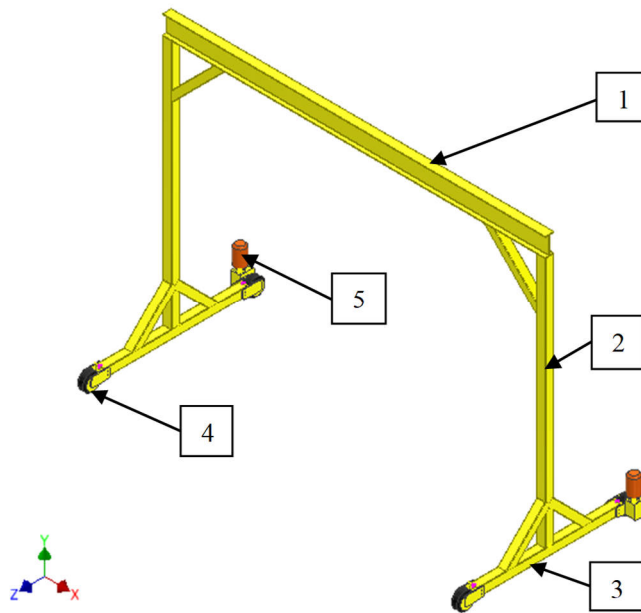
Suwnica bramowa najczęściej jest użytkowana w magazynach oraz placach magazynowych, gdzie odbywa się transport ładunków w przestrzeni, w której występują przeszkody, np. w postaci składowanego materiału. Operator sterujący suwnicą musi starać się, aby czas transportu był jak najkrótszy, jednakże nie mogą powstać zbyt duże wahania ładunku [1, 2]. Aby zapobiec nadmiernym wahaniom ładunku, należy zastosować odpowiedni układ regulacji pracą urządzenia. Doboru takiego układu najczęściej dokonuje się za pomocą symulacji numerycznych, wykorzystując w tym celu dostępne oprogramowanie [3-6].

Celem pracy jest wykonanie modelu obliczeniowego suwnicy bramowej, zaprojektowanie układu regulacji ruchami suwnicy oraz dokonanie analizy zachowania się ładunku w stosunku do zadanych trajektorii ruchu.

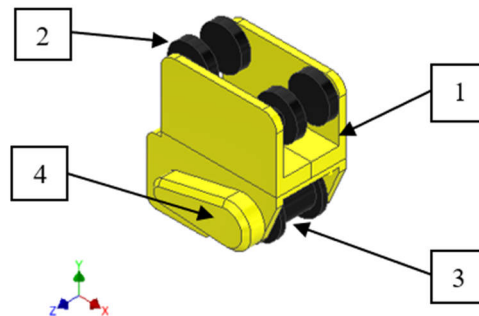
2. Model geometryczny suwnicy bramowej

Model geometryczny suwnicy bramowej został opracowany przy użyciu oprogramowania Autodesk INVENTOR na podstawie konstrukcji rzeczywistego urządzenia, tj. suwnicy bramowej firmy PROMAG S.A [7]. W modelu tym uwzględniono tylko kluczowe elementy mające wpływ na pracę urządzenia, tzn. bramę suwnicy z kołami i układem napędowym (rys. 1), wózek z wciągarką (rys. 2) oraz zblocze hakowe z liną (rys. 3).

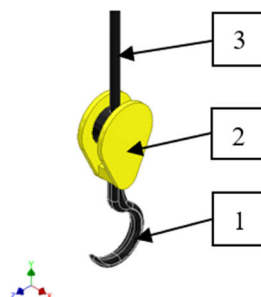
Parametry modelu przyjęto na podstawie danych technicznych suwnicy o udźwigu 3 ton, której brama ma 4 metry szerokości i 3 metry wysokości.



Rysunek 1. Model geometryczny bramy suwnicy (1 - dźwigar, 2 - podpora pionowa, 3 - podpora pozioma, 4 - koło jezdne, 5 - układ napędowy bramy)



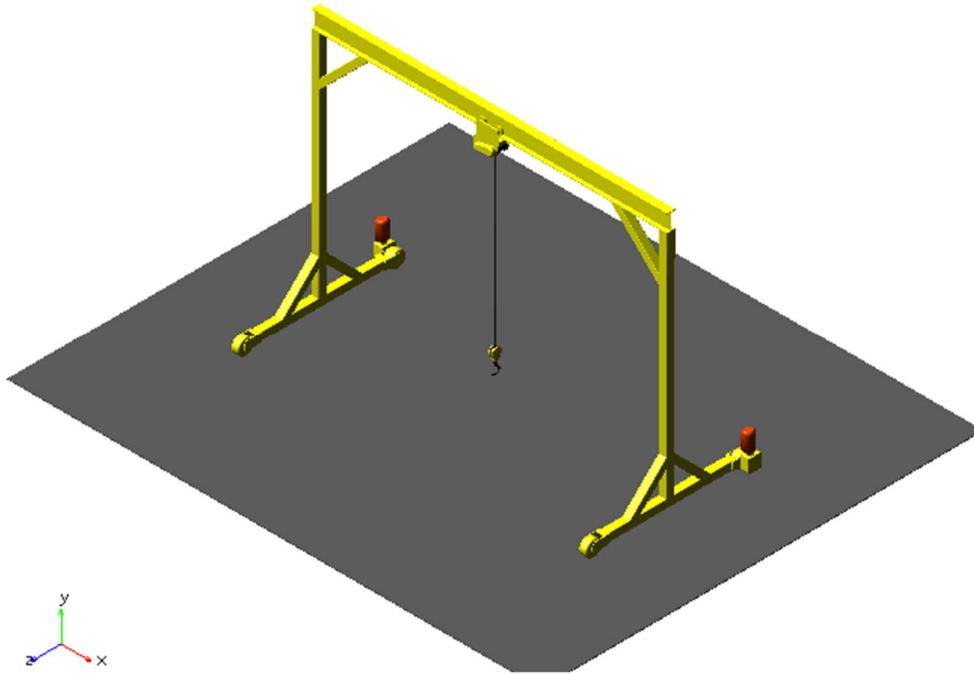
Rysunek 2. Model geometryczny wózka suwnicy (1 - korpus wózka, 2 - rolki jezdne, 3 - bęben wciągarki, 4 - napęd wciągarki)



Rysunek 3. Model geometryczny zblocza hakowego z liną (1 - hak, 2 - zblocze, 3 - lina)

3. Model obliczeniowy suwnicy

W oparciu o modele geometryczne poszczególnych elementów suwnicy, które zostały zaimportowane w formacie Parasolid z programu Autodesk INVENTOR, w programie MSC.ADAMS opracowano jej model obliczeniowy, który pokazano na rysunku 4. W modelu obliczeniowym elementy składowe suwnicy zostały połączone w pary kinematyczne za pomocą dostępnych w programie wiązań, odwzorowujących rzeczywiste ruchy i połączenia elementów.



Rysunek 4. Model obliczeniowy suwnicy bramowej

Jako ładunek podwieszony na linie zastosowano masę skupioną w punkcie zlokalizowanym w miejscu połączenia haka ze zbloczem. Przyjęto ładunek o masie 1500 kg, co odpowiada połowie maksymalnego udźwigu suwnicy. Linę znajdującą się pomiędzy bębnem wciągarki i zbloczem hakowym zamodelowano przy użyciu funkcji *Discrete Flexible Link*, za pomocą której podzielono linę na 15 połączonych ze sobą elementów skończonych umożliwiających odwzorowanie jej odkształceń podczas ruchu.

Każdemu z elementów suwnicy, na podstawie przyjętych materiałów z jakich zostało wykonane urządzenie, przyporządkowano masy oraz masowe momenty bezwładności, a ich zestawienie zamieszczono w Tabeli 1.

Tabela 1. Masy oraz masowe momenty bezwładności elementów suwnicy

Element suwnicy	Masa [kg]	Masowe momenty bezwładności [kg*m ²]		
		I _{xx}	I _{yy}	I _{zz}
Brama	539.78	2481.04	1831.14	836.64
Wózek	62.14	0.75	0.70	0.49
Lina	8.84	7.01	7.01	2.49
Hak	2.51	1.33	1.28	1.62

Opracowując model obliczeniowy przyjęto pewne uproszczenia, wynikające z zasad tworzenia tego typu modeli [8]. Pominięto mianowicie opory ruchu i tarcie, pominięto także wpływ warunków atmosferycznych, tj. temperatury i wiatru na konstrukcję suwnicy, a wszystkie człony, oprócz liny, przyjęto za nieodkształcalne. Przestrzeń pracy suwnicy umieszczono w kartezjańskim układzie współrzędnych. Założono, że ruch bramy odbywa się w kierunku osi Z, natomiast ruch wózka wzdłuż dźwigara realizowany jest w kierunku osi X.

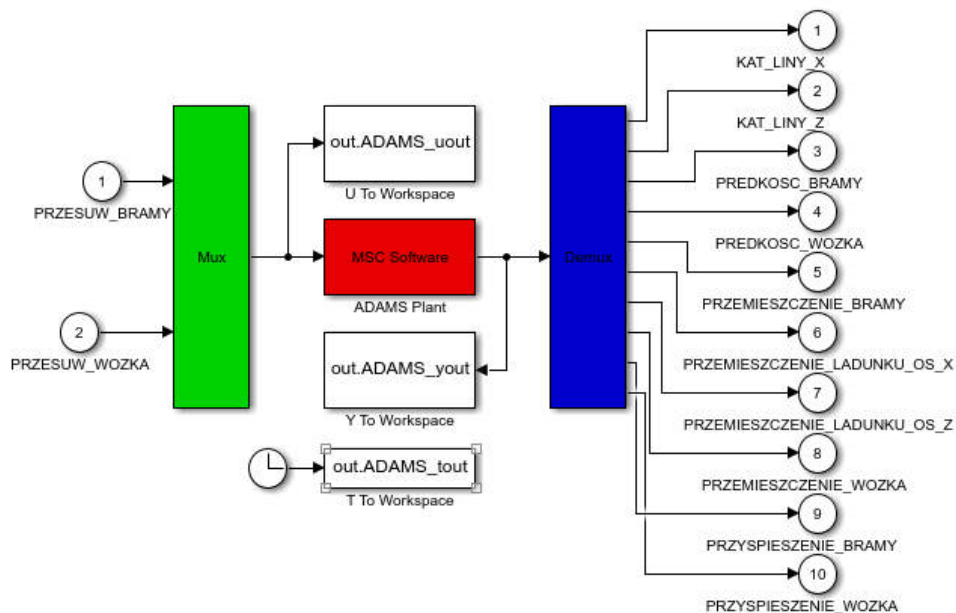
Wymuszenie ruchu bramy i wózka uzyskano poprzez oddziaływanie wektorów sił na te elementy. Wartości powyższych sił wyznaczano w układzie regulacji, a następnie przekazywano do modelu obliczeniowego przy użyciu zdefiniowanych dla niego tzw. zmiennych wejściowych, które nazwano odpowiednio: przesuw bramy i przesuw wózka.

Oprócz zmiennych wejściowych w modelu obliczeniowym zdefiniowano także tzw. zmienne wyjściowe, które zbierają informacje o stanie modelu podczas symulacji jego działania, takie jak przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia poszczególnych członów, a następnie przekazują je do układu regulacji. Jako zmienne wyjściowe zdefiniowano przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie bramy oraz wózka, przemieszczenie ładunku w kierunku osi X oraz Z, a także kąt nachylenia liny w płaszczyznach XY oraz ZY.

Edycję modelu obliczeniowego suwnicy bramowej zakończono dokonując eksportu wcześniej zdefiniowanych zmiennych do plików nazywanych „Plant Files”, możliwych do zaimportowania przez oprogramowanie zewnętrzne, takie jak np. program MATLAB.

4. Opracowanie modelu układu regulacji

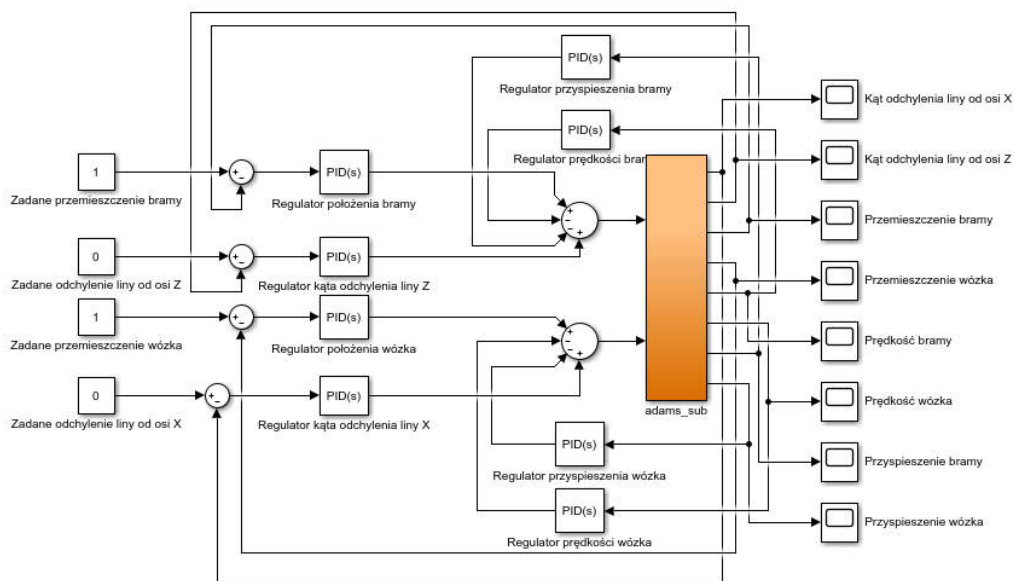
Model układu regulacji ruchami roboczymi suwnicy bramowej opracowano w programie MATLAB/Simulink na podstawie plików „Plant Files”, które wygenerowano w programie MSC.ADAMS. W pierwszym kroku dokonano wyboru folderu roboczego, w którym znajdowały się wyżej wymienione pliki, a następnie otwarto je w programie MATLAB. Jako pierwszy element projektowanego w programie MATLAB/Simulink układu regulacji został użyty blok funkcyjny o nazwie „adams_sub”, który otrzymano po wpisaniu w głównym oknie programu MATLAB polecenia „adams_sys”.



Rysunek 5. Struktura bloku „adams_sub”

Blok „adams_sub” (rys. 5) stanowi podukład odpowiedzialny za komunikację pomiędzy programem MATLAB i programem MSC.ADAMS. Jego głównymi elementami są bloki Mux (tj. Multiplexer) i Demux (tj. Demultiplexer). Pierwszy z nich odpowiada za łączenie w tzw. wektor wirtualny zmiennych wejściowych do modelu obliczeniowego, a następnie przekazanie ich do oprogramowania MSC.ADAMS. Z kolei drugi z wyżej wymienionych bloków pobiera z programu MSC.ADAMS wektor wirtualny utworzony przez wielkości wyjściowe z modelu obliczeniowego, a następnie wyodrębnia je jako wartości poszczególnych zmiennych wyjściowych opisujących zachowanie się członów modelu w funkcji czasu.

Wykorzystując powyżej przedstawiony blok funkcyjny przystąpiono do projektowania układu regulacji służącego do sterowania ruchami roboczymi suwnicy bramowej. W projektowanym układzie użyto wyłącznie regulatorów proporcjonalno-całkująco-różniczkujących (PID). Projekt pierwszej wersji modelu układu regulacji został przedstawiony na rysunku 6.

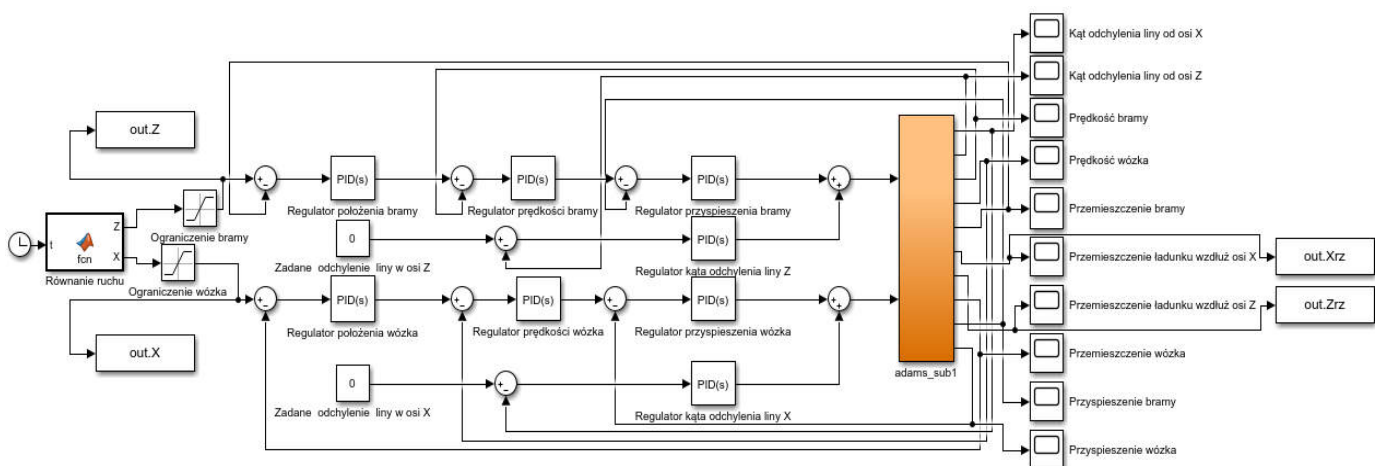


Rysunek 6. Schemat blokowy modelu układu regulacji ruchami roboczymi suwnicy bramowej - wersja pierwsza

W powyższym układzie zastosowano równoległe połączenie regulatorów położenia, prędkości oraz przyspieszenia poszczególnych członów, a także regulatorów korygujących odchylenie od pionu linii, na której podwieszono ładunek. Jako wartość zadaną dla projektowanego układu regulacji przyjęto odległość od punktu początkowego, o jaką mają przemieścić się brama oraz wózek, aby dotrzeć do punktu końcowego. Jednakże takie sterowanie ruchem ładunku nie dawało możliwości wpływania na trajektorię, jaką ładunek będzie się przemieszczał, ponieważ trajektoria była zawsze prostoliniowa, co w efekcie uniemożliwiało sprawdzenie zachowania się ładunku podczas innych ruchów.

Tak zaprojektowany układ poddano testom symulacyjnym, podczas których metodą prób i błędów dobierano nastawy regulatorów. Jednak po wykonaniu wielu prób okazało się, iż w tak przyjętym układzie dobranie wartości nastaw jest bardzo trudne, ponieważ konieczne było jednoczesne korygowanie nastaw czterech regulatorów PID, co znacząco utrudniało dobranie dla nich prawidłowych ustawień.

Działając na podstawie początkowo zdobytych doświadczeń przystąpiono do modyfikacji układu regulacji, na taki, który w znaczący sposób ułatwiłby dobór odpowiednich nastaw. Korzystając z informacji zamieszczonych w pracy [3] zdecydowano o zastosowaniu w projektowanym układzie szeregowego połączenia poszczególnych regulatorów. Tak utworzony układ pokazano na rysunku 7.



Rysunek 7. Schemat blokowy modelu układu regulacji ruchami roboczymi suwnicy bramowej - wersja druga

W przedstawionym na rysunku 7 modelu układu regulacji, w stosunku do pierwszej jego wersji, oprócz wprowadzenia szeregowego połączenia regulatorów, dokonano także zmiany polegającej na tym, iż zamiast stałych, zadanych wartości przemieszczeń do punktu docelowego zarówno bramy jak i wózka, zastosowano blok „Równanie ruchu”

zawierający równania, które umożliwiają określenie przemieszczeń bramy oraz wózka w funkcji zadanych współrzędnych ładunku odpowiadających realizowanej trajektorii jego ruchu.

W układzie regulacji ruchu bramy jako pierwszy zastosowano regulator PID wykorzystujący sprzężenie zwrotne od jej przemieszczenia. Nastawy tego regulatora zostały dobrane metodą prób i błędów. Otrzymane rezultaty pracy układu nie były jednak zadowalające, ponieważ stwierdzono przeregulowanie wartości o 70%, co jest niedopuszczalne w takich konstrukcjach. W celu poprawy działania układu regulacji zastosowano kolejny regulator ze sprzężeniem zwrotnym, odpowiadający za korektę prędkości bramy, który został szeregowo połączony z regulatorem pozycji. Jako następny został zastosowany regulator przyspieszenia korygujący przyspieszenie bramy względem przyspieszenia mierzonego w trakcie ruchu. Aby skorygować odchylenie od pionu liny, na której podwieszono ładunek, zastosowano regulator odchylenia monitorujący linię w płaszczyźnie ZY.

Postępując analogicznie przeprowadzono takie same działania w odniesieniu do układu sterowania ruchem wózka, wyłączając przy tym ruch bramy, aby nie powodował zakłóceń.

5. Analiza działania układu regulacji

Aby sprawdzić poprawność działania zaprojektowanego układu regulacji przeprowadzono analizy numeryczne sterowania ruchami roboczymi modelu obliczeniowego suwnicy bramowej w celu odwzorowania zadanych trajektorii ruchu ładunku. Analizy przeprowadzono dla ładunku o masie 1500 kg zawieszono na linie o długości 2 m, wykorzystując zaimplementowane w programie MSC.ADAMS narzędzie umożliwiające komunikację z programem MATLAB/Simulink. Analizie poddano dwie trajektorie ruchu ładunku: prostoliniową oraz sinusoidalną.

Testowanie układu regulacji rozpoczęto od przeprowadzenia analizy ruchu ładunku wzdłuż trajektorii prostoliniowej, którą opisano równaniami przedstawionymi na rysunku 8.

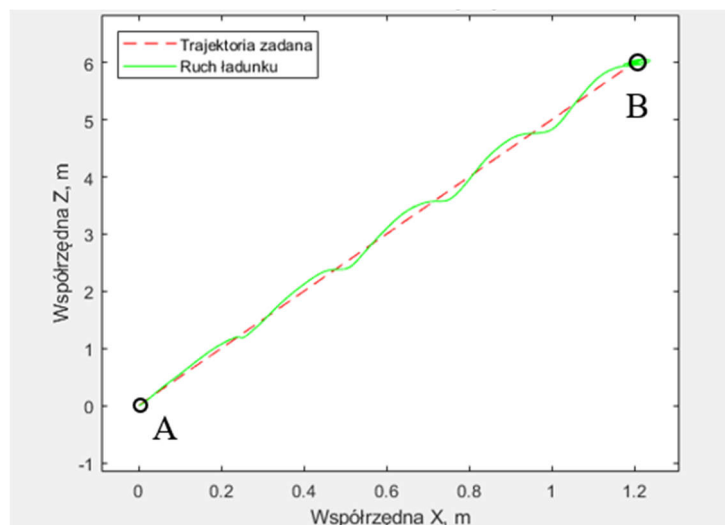
```

Równanie ruchu* x +
1 function [Z,X] = fcn(t)
2 % Dane
3 A = [0,0]; % współrzędne punktu A [X,Z]
4 B = [1.2,6]; % współrzędne punktu B [X,Z]
5 T = 20; % założony końcowy czas ruchu
6 % równania ruchu wzdłuż linii prostej
7 X = A(1,1)+t*(B(1,1)-A(1,1))/T;
8 Z = (A(1,2)-B(1,2))*((X-A(1,1))/(A(1,1)-B(1,1))+A(1,2));

```

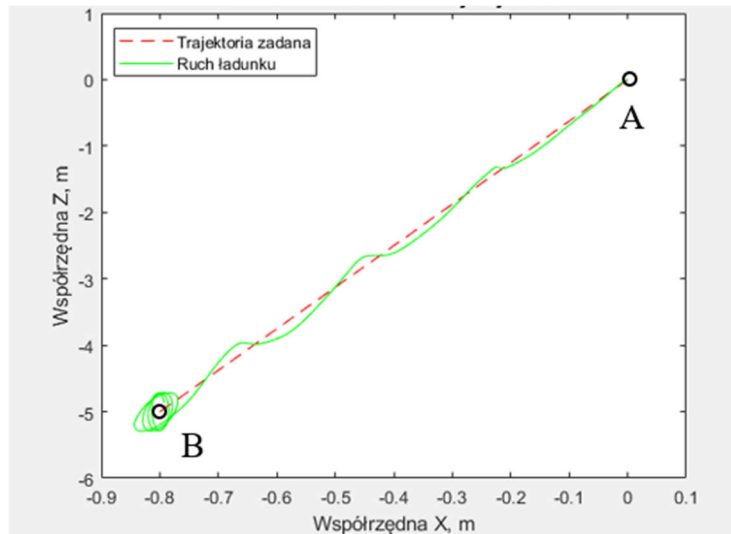
Rysunek 8. Równania ruchu dla trajektorii prostoliniowej

Analizy przeprowadzono dla dwóch wartości czasu, w którym ładunek ma zostać przemieszczony z punktu A do punktu B. W pierwszej kolejności analizowano ruch z pozycji początkowej w punkcie A [0, 0] do pozycji końcowej w punkcie B [1.2, 6] realizowany w czasie 20 sekund (rys. 9).



Rysunek 9. Ruch ładunku względem zadanej trajektorii prostoliniowej realizowany w czasie 20 sekund

W ramach drugiej analizy ruchu prostoliniowego testowano wykonanie ruchu w odwrotnym kierunku niż w pierwszym przypadku, tj. z punktu A [0, 0] do punktu B [-0.8, -5] w czasie 15 sekund (rys. 10).



Rysunek 10. Ruch ładunku względem zadanej trajektorii prostoliniowej realizowany w czasie 15 sekund

Po wykonaniu symulacji, w obu przypadkach stwierdzono, iż dla ruchu prostoliniowego trajektoria ładunku nieznacznie odbiega od zadanej, a narastające stopniowo odchylenie osiąga wartość maksymalną około 10 cm w przypadku ruchu trwającego 15 sekund. Po zatrzymaniu ruchu pod wpływem sił bezwładności ładunek wykonuje oscylacje wokół punktu końcowego. Dla ruchu prostoliniowego realizowanego w czasie 20 sekund (tzn. z mniejszą prędkością) największe odchylenie od punktu docelowego w trakcie oscylacji wynosi 4 cm, z kolei dla ruchu wykonywanego z większą prędkością wartość największego odchylenia od pozycji końcowej wynosi aż 20 cm. Drugą analizowaną trajektorią była trajektoria krzywoliniowa w postaci sinusoidy, którą opisano równaniami przedstawionymi na rysunku 11.

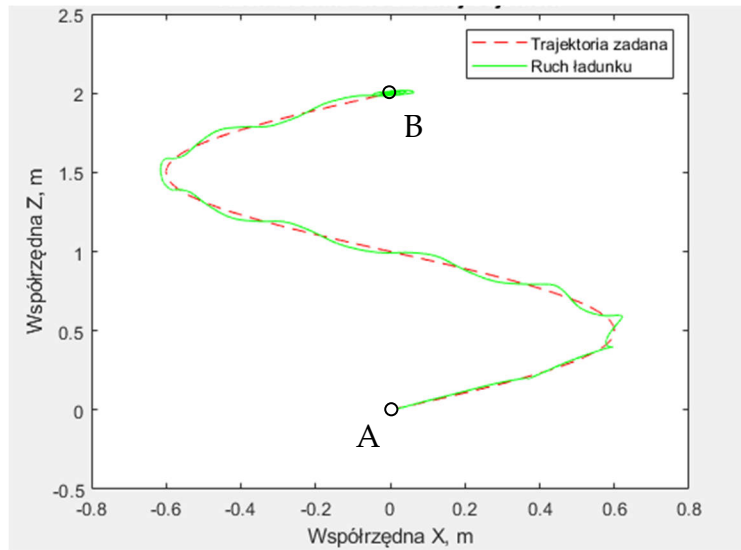
```

10 % równania ruchu krzywoliniowego
11 - maxAmp = 0.6;
12 - amplitude = linspace(0, maxAmp, length(t));
13 - Z = A(1,2)+t*(B(1,2)-A(1,2))/T;
14 - if t < T
15 -     X = 0+ amplitude *(1.2-0)*sin(2*pi*t/T);
16 - else
17 -     X = 0;
18 - end

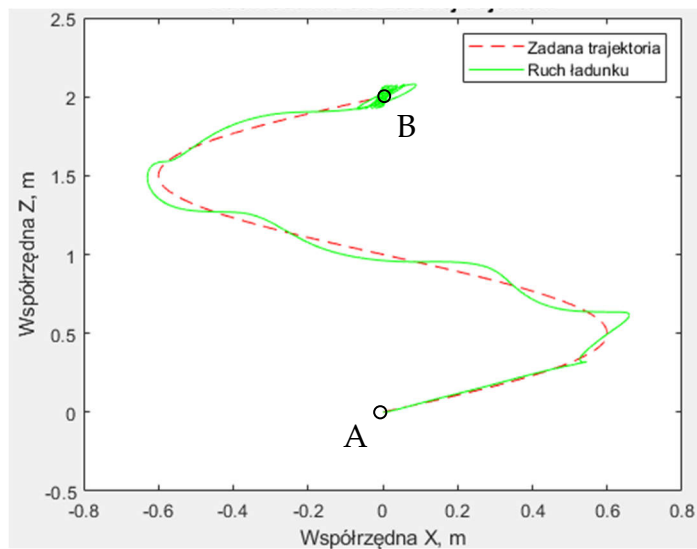
```

Rysunek 11. Równania ruchu dla trajektorii krzywoliniowej w postaci sinusoidy

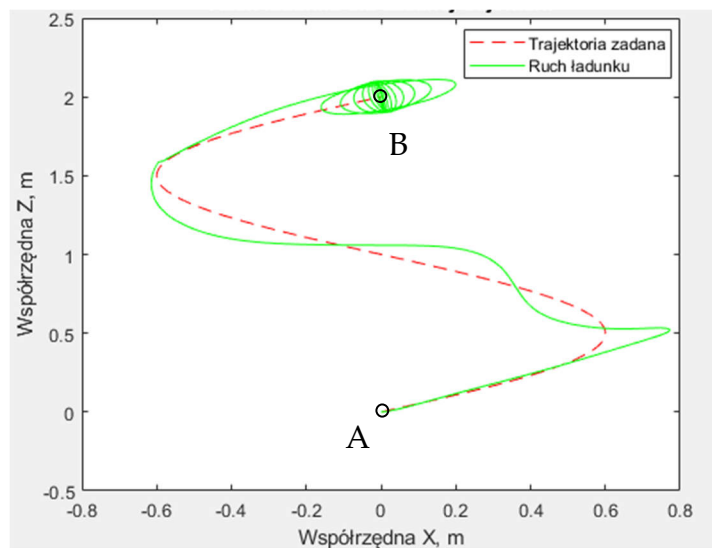
Założono, że w analizowanym ruchu brama suwnicy przemieszcza się po prostej pokonując dystans 2 metrów, natomiast wózek w tym samym czasie przebywa trasę pełnej sinusoidy o amplitudzie 0.6 metra. Analizy przeprowadzono dla trzech wartości czasu, w którym ładunek ma zostać przemieszczony z punktu A do punktu B. Na rysunku 12 pokazano przebieg ruchu ładunku realizowany w czasie 40 sekund, na rysunku 13 przedstawiono ten sam ruch o czasie trwania 25 sekund, natomiast analizę ruchu trwającego 15 sekund, zaprezentowano na rysunku 14. Porównania trajektorii ładunku otrzymanych z symulacji dla różnych czasów trwania ruchu krzywoliniowego dokonano na rysunku 15.



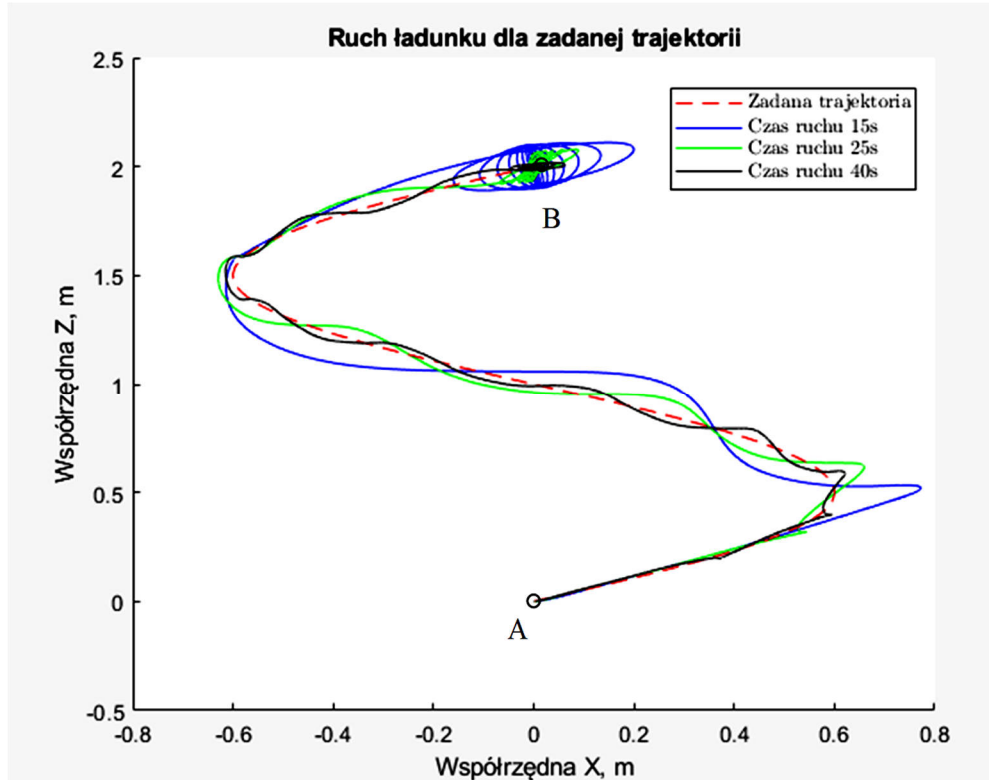
Rysunek 12. Ruch ładunku względem zadanej trajektorii w postaci sinusoidy realizowany w czasie 40 sekund



Rysunek 13. Ruch ładunku względem zadanej trajektorii w postaci sinusoidy realizowany w czasie 25 sekund



Rysunek 14. Ruch ładunku względem zadanej trajektorii w postaci sinusoidy realizowany w czasie 15 sekund



Rysunek 15. Porównanie trajektorii otrzymanych z symulacji dla ruchu sinusoidalnego

Na podstawie analiz stwierdzono, że podczas trwającego 40 sekund ruchu ładunku wzdłuż trajektorii sinusoidalnej jego odchylenie od niej nie przekracza 4 cm, ale wraz ze skracaniem czasu przebycia zadanej trajektorii obserwowane odchylenia istotnie zwiększają się, osiągając wartości odpowiednio 7 cm dla ruchu trwającego 25 sekund i 18 cm dla ruchu trwającego 15 sekund. Podobnie przedstawia się sytuacja po dotarciu ładunku do pozycji docelowej. Ładunek pod wpływem działania sił bezwładności oscyluje wokół punktu końcowego, a jego największe odchylenie od tego punktu w trakcie oscylacji wynosi 6 cm po zakończeniu ruchu trwającego 40 sekund, 8 cm po zakończeniu ruchu trwającego 25 sekund oraz 20 cm po zakończeniu ruchu trwającego 15 sekund.

W przypadku trajektorii sinusoidalnej krzywizna toru powoduje, że wraz ze skracaniem czasu przebycia danego dystansu, a więc ze wzrostem prędkości ruchów roboczych, można zaobserwować większe niezgodności odwzorowania trajektorii zadanej niż w ruchu po linii prostej. Z kolei wielkość przemieszczeń ładunku względem punktu końcowego obserwowanych po zakończeniu ruchu jest proporcjonalna do prędkości ruchów roboczych podczas przenoszenia ładunku i tylko nieznacznie zależy od kształtu trajektorii, wzdłuż której przemieszczano ładunek.

6. Podsumowanie i wnioski

W pracy zaprezentowano projekt układu regulacji ruchami roboczymi suwnicy bramowej, który został opracowany dla modelu obliczeniowego utworzonego w oprogramowaniu MSC.ADAMS. Za podstawę budowy modelu obliczeniowego przyjęto model geometryczny, który zamodelowano za pomocą oprogramowania Autodesk INVENTOR na podstawie konstrukcji rzeczywistej suwnicy bramowej firmy PROMAG S.A. Wykorzystując współpracę programu MSC.ADAMS z programem MATLAB/Simulink zaprojektowano układ regulacji ruchów roboczych suwnicy bramowej, a następnie opisano w jaki sposób dobrano nastawy regulatorów.

W zaprojektowanym przy użyciu programu MATLAB/Simulink układzie regulacji zastosowano szeregowe połączenie regulatorów. Tak utworzony układ w znaczący sposób ułatwia dobór nastaw regulatorów, co zostało pokazane w pracy. Podczas doboru nastaw dla układu regulacji, w którym regulatory początkowo były połączone równolegle, konieczne było korygowanie nastaw kilku regulatorów w jednym czasie, co przekładało się na trudności związane ze znalezieniem prawidłowych wartości nastaw. Stosując szeregowe połączenie regulatorów możliwe stało się odrębne dobieranie nastaw poszczególnych regulatorów. Dzięki temu jeśli osiągnięto zadowalające rezultaty dla jednego regulatora, a wyniki w dalszym ciągu odbiegały od oczekiwanych, możliwe było dołączenie kolejnego regulatora, dzięki czemu osiągnięto zaprezentowane w pracy trajektorie ruchu suwnicy.

Dobór odpowiednich nastaw regulatorów tak, aby trajektoria ruchu ładunku pokrywała się z zadaną, jest trudnym i czasochłonnym procesem, a uzyskanie idealnej trajektorii nie jest możliwe. Przyczynę powyższych problemów stanowią zarówno siły bezwładności występujące w ruchu bramy i wózka, jak i siły bezwładności pod wpływem których pozostaje ładunek. Duże znaczenie ma także długość liny, na której ładunek został zawieszony.

Zaprojektowany układ regulacji nie posiada możliwości zmian nastaw regulatorów w zależności od długości liny, jednakże dobór nastaw został dokonany dla liny o maksymalnej długości.

Literatura

1. Piątkiewicz A., Sobolski R.: Dźwignice. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 1969.
2. Nieoczym A., Brumercik F.: Maszyny i urządzenia transportu bliskiego. Politechnika Lubelska, Lublin 2015.
3. Gierlotka K.: Układ sterowania mechanizmu jazdy suwnicy z szeregowym połączeniem regulatorów prędkości i kąta wychylenia liny. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 2000, Seria: Elektryka, z.172, nr 1470.
4. Balak C., Smoczek J., Szpytko J.: Układ sterowania z logiką rozmytą w systemach napędowych suwnic pomostowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 2004, Seria: Transport, z.53, nr 1643.
5. Smoczek J., Szpytko J.: Sposoby sterowania zautomatyzowanymi suwnicami pomostowymi. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, 2010, Seria: Transport, z.73.
6. Gierlotka K., Doulen A.: Dobór regulatorów w układzie sterowania mechanizmu jazdy suwnicy. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 2000, Seria: Elektryka, z.172, nr 1470.
7. Suwnica bramowa firmy PROMAG S.A. <https://e-promag.pl/katalog/Suwnica-samojezdna-bramowa,6120.html> (10.03.2023).
8. Borkowski W., Konopka S., Prochowski L.: Dynamika maszyn roboczych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.