

Janusz Hetmańczyk, Łukasz Gawleta, Krzysztof Krykowski
Politechnika Śląska, Gliwice

MODEL KOMPUTEROWY WIELOSILNIKOWEGO NAPĘDU MANIPULATORA RÓWNOLEGŁEGO Z BEZSZCZOTKOWYMI SILNIKAMI PRĄDU STAŁEGO

A COMPUTER MODEL OF A PARALLEL MULTI-DRIVE MANIPULATOR OF BRUSHLESS DC MOTORS

Streszczenie: W artykule przedstawiono model komputerowy napędu manipulatora równoległego o kinematyce platformy Stewarta. Model składa się z dwóch części. Pierwsza, wykonana w programie SolidWorks, pozwala na przeprowadzenie badań kinematyki, dynamiki i wytrzymałości mechanicznej oraz na wizualizację trójwymiarową pracy platformy. Druga część modelu jest wykonana w programie Matlab/Simulink. W tej części zamodelowano napęd platformy, składający się z 6 bezszczotkowych silników prądu stałego wraz z układem sterowania i regulacji. Przedstawiono również wybrane wyniki symulacji opisujących ruch platformy.

Abstract: This paper presents a drive computer model for parallel manipulator of Stewart platform kinematics. The model consists of two parts. First, realized in SolidWorks software, allows performing the research of kinematics, dynamics and mechanical strength as well as three-dimensional visualization of the platform operation. The second part of the model is designed in Matlab / Simulink environment. In this part drive platform, consisting of 6 brushless DC motors with the control and regulation system, was simulated. Selected results of the simulation, describing the motion of the platform, were presented.

Słowa kluczowe: manipulator równoległy, platforma Stewarta, bezszczotkowy silnik prądu stałego
Keywords: parallel manipulator, Stewart platform, brushless dc motor

1. Wprowadzenie

Przedmiotem publikacji jest napędzana elektrycznie platforma o sześciu stopniach swobody o kinematyce manipulatora równoległego. Platforma o strukturze równoległej składa się z dwóch podstaw (platform), połączonych ze sobą przez sześć niezależnych łańcuchów kinematycznych. Protoplastą układów o strukturze równoległej jest ruchoma platforma połączona przegubami kulowymi z sześcioma teleskopowymi siłownikami, zaproponowana przez Gough'a w 1947 roku. Jednak dopiero konstrukcja opracowana przez Stewarta w 1965 roku jako symulator lotu (mechanizm o strukturze równoległej o sześciu stopniach swobody), przyczyniła się do wprowadzenia do teorii maszyn pojęcia platformy Stewarta. Spotykane jest również określenie platformy Stewarta-Gougha [3, 7, 8].

Do zalet platformy o strukturze równoległej możemy zaliczyć możliwość realizacji ruchu w 6 stopniach swobody, uzyskanie dużych przyspieszeń i prędkości ze względu na małą masę części ruchomych, dużą dokładność pozycjonowania wynikającą z dużej sztywności, korzystny stosunek masy do objętości oraz, że

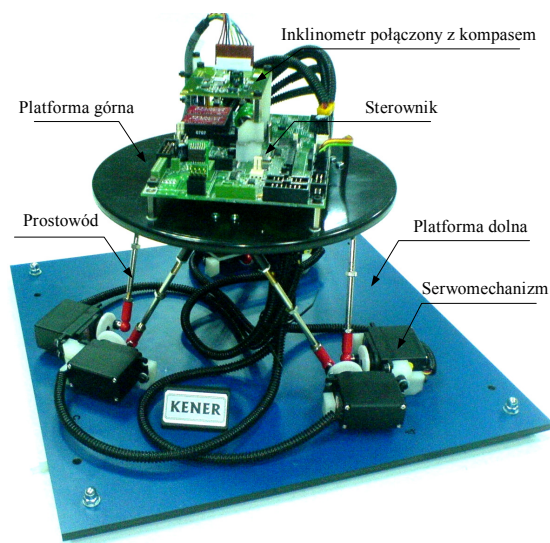
wszystkie układy napędowe są identyczne. Do wad platformy należą ograniczenia przestrzeni roboczej (często jest ona dużo mniejsza niż gabaryty platformy), możliwość kolizji pomiędzy członami, występowanie punktów osobliwych w przestrzeni roboczej, trudności w wyznaczeniu bezpośrednich parametrów geometryczno-kinematycznych, skomplikowany układ sterowania, złożoność sprzężeń między ruchomymi łańcuchami kinematycznymi. Platformy o takiej konstrukcji są wykorzystywane w układach symulatorów, w stanowiskach badawczych pozwalających na przebadanie wpływu wstrząsów na działanie badanego układu lub w układach stabilizacji podczas transportu. Celem artykułu jest opis modelu komputerowego platformy o strukturze manipulatora równoległego umożliwiającego symulację z jednoczesną wizualizacją trójwymiarową pracy platformy.

2. Stan aktualny

Prezentowany w publikacji model komputerowy jest częścią projektu obejmującego konstrukcję i syntezę metody sterowania manipulatora równoległego o kinematyce platformy

Stewartą napędzanego sześciosiłnikowym napędem opartym na silnikach bezszczotkowych prądu stałego (PM BLDC). Każdy z silników jest zasilany za pośrednictwem odrębnego komutatora elektronicznego [2]. W układzie napędu platformy istnieje możliwość: pomiaru prądu (momentu), prędkości, kąta obrotu wału każdego z silników oraz określenia wychyleń i przyspieszeń platformy za pośrednictwem układów pomiarowych zrealizowanych przy wykorzystaniu akcelerometrów i żyroskopów elektronicznych. W docelowym układzie rzeczywistym platforma będzie sterowana z poziomu komputera przemysłowego wyposażonego w odpowiednie karty wejść i wyjść. Komputer musi działać pod kontrolą systemu operacyjnego czasu rzeczywistego.

Aby sprecyzować szczegółowe założenia prac mających na celu realizację rzeczywistego obiektu zbudowano zredukowany model platformy (rys. 1). Wstępnie założono, że zarówno model zredukowany jak i obiekt rzeczywisty będą sterowane z poziomu komputera [9].



Rys. 1. Widok zredukowanego modelu platformy Stewarta

W konstrukcji zredukowanego modelu platformy Stewarta wykorzystano serwomechanizmy prądu stałego sterowane impulsowo. Ze względu na to, że elementy te pracują w układzie wewnętrznego sprzężenia zwrotnego, nadrzędny układ sterowania można potraktować jako otwarty. W takim przypadku, nie ma konieczności stosowania sprzężeń od wydłużenia poszczególnych siłowników doprowadzonych do nadrzędnego układu sterowania. Wartość

zadana wydłużenia pojedynczego siłownika jest osiągana po czasie wynikającym ze stałej czasowej pojedynczego serwomechanizmu oraz z jego aktualnego obciążenia. Brak sprzężenia zwrotnego dla nadrzędnego układu regulacji położenia platformy stanowi różnicę w strukturze sterowania modelu zredukowanego w stosunku do sterowania siłownikiem w projektowanym urządzeniu docelowym.

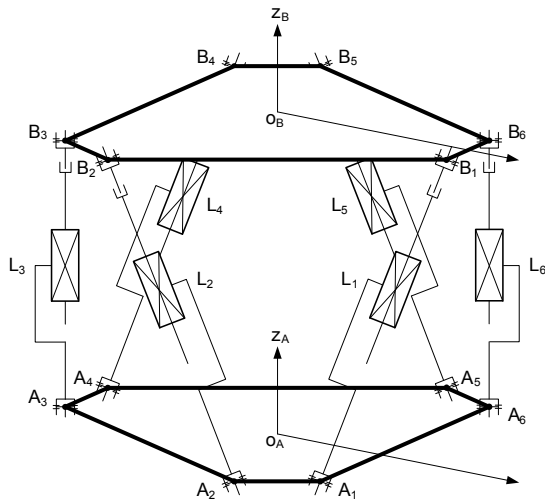
Budowa modelu zredukowanego pozwala na dobór i praktyczną weryfikację rozwiązań przewidzianych do zastosowania w układzie docelowym. Dysponując modelem zredukowanym można dokonać doboru, a następnie analizy działania w czasie rzeczywistym, przy uwzględnieniu złożoności obliczeniowej metod numerycznych i algorytmów przeznaczonych do zastosowania w urządzeniu docelowym. Możliwe jest również oszacowanie wymaganej mocy obliczeniowej docelowej jednostki sterującej. Ponadto można praktycznie zweryfikować rozwiązania układów sensorycznych pozwalających na prowadzenie pomiarów wychyleń i przemieszczeń platformy.

3. Model komputerowy projektowanego manipulatora równoległego

Równoległe z prowadzonymi pracami nad modelem zredukowanym opracowano analityczny model kinematyki platformy (rys. 2), na którego podstawie wyznaczono graficzne modele trójwymiarowe w programach Inventor oraz SolidWorks. Współczesne środowiska komputerowego wspomaganie projektowego, takie jak użyte oprogramowanie SolidWorks, umożliwiają nie tylko projektowanie trójwymiarowych modeli, ale również badania kinematyki, dynamiki i wytrzymałości elementów modelowanych urządzeń docelowych.

Podstawą modelu matematycznego projektowanej platformy jest układ trzech współrzędnych kartezjańskich (X, Y, Z) oraz trzech kątów (ψ, θ, φ). Środkowy punkt górnego pokładu platformy traktuje się jako środek ruchomego układu współrzędnych związanego z manipulatorem. Bazowy układ współrzędnych jest zamocowany w środkowym punkcie dolnego pokładu. Platformę dolną opisano punktami A1, A2, A3, A4, A5 i A6 natomiast platformę górną opisano punktami B1, B2, B3, B4, B5 i B6. Platformy połączone są przy pomocy sześciu siłowników liniowych oznaczonych jako L1, L2, L3, L4, L5 i L6. Sterowanie platformą ruchomą polega na odpowiedniej zmianie długo-

ści każdego z ramion, co zapewnia platformie właściwą liczbę stopni swobody.

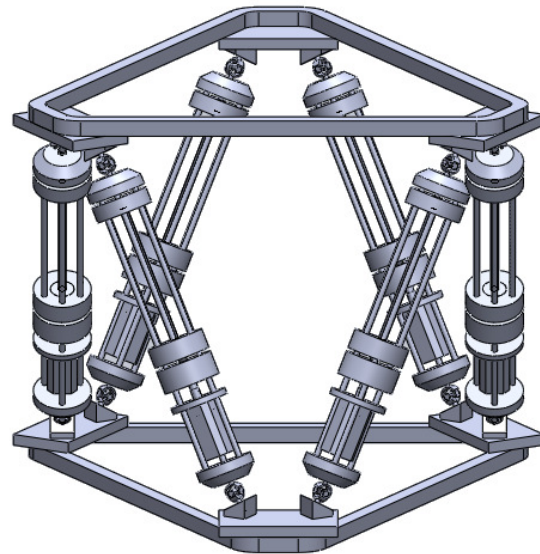


Rys. 2. Schemat kinematyczny manipulatora równoległego

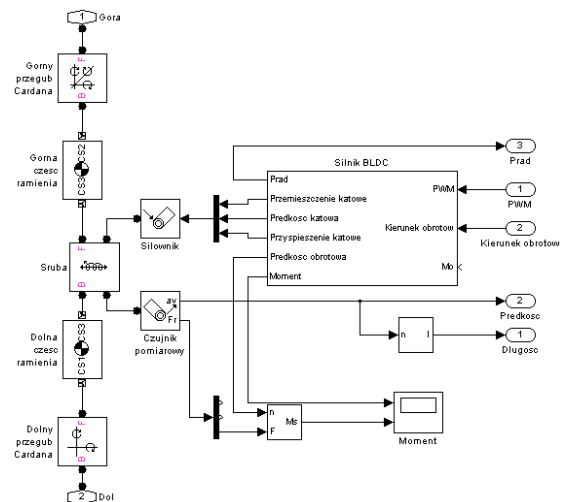
W pierwszym etapie budowy modelu w programie SolidWorks wykonano rysunki wszystkich części, z których składa się platforma. Rysunki te przedstawiono jako reprezentację trójwymiarową pojedynczego komponentu projektu. Każda część posiada określone wymiary oraz właściwości materiału, z którego została wykonana. Położenie każdego elementu oraz relacje pomiędzy nimi zostały dokładnie określone za pomocą wiązań, które zostały tak dobrane, aby najdokładniej odpowiadały rzeczywistemu układowi oraz umożliwiły platformie górnej na swobodne ruchy. Po złożeniu wszystkich elementów składowych uzyskano model manipulatora jak przedstawiono na rysunku 3. Następnie w module SolidWorks Motion dokonano konfiguracji różnych scenariuszy ruchu. Określono parametry kontaktów brylowych pomiędzy poszczególnymi elementami. Skonfigurowano parametry tłumików pomiędzy parami śruby-nakrętka określające relacje pomiędzy nimi, do których dodano momenty obrotowe napędzające śruby, siłę grawitacji oraz siłę działającą na platformę górną.

Możliwa jest integracja opracowanego modelu z oprogramowaniem pozwalającym na opracowanie odrębnego modelu komputerowego umożliwiającego modelowanie, syntezę i symulację układu sterowania. Jako przykład można podać zestaw narzędzi zintegrowanych z programem Matlab, pozwalający na eksport opracowanych modeli do formatu zgodnego z pakietem SimMechanics dostępnym w opro-

gramowaniu Matlab/Simulink. Dzięki opisanej operacji można uzyskać model implementujący odwrotne zadanie kinematyki.



Rys. 3. Model manipulatora równoległego w programie SolidWorks



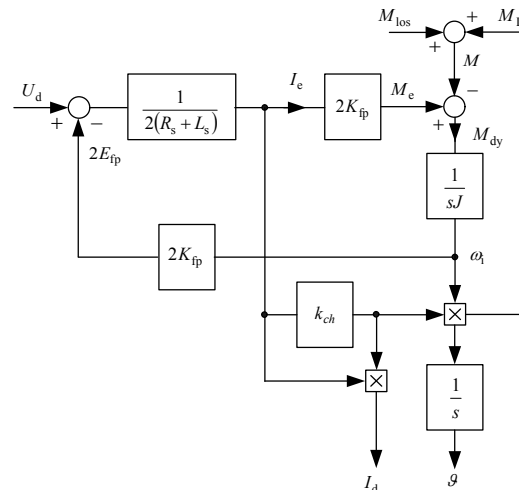
Rys. 4. Model pojedynczego ramienia manipulatora w programie Matlab/Simulink z wykorzystaniem bibliotek SimMechanics oraz SimPowerSystems

Na rysunku 4 przedstawiono model pojedynczego ramienia manipulatora w programie Matlab/Simulink. Każde z 6 ramion składa się z dwóch części połączonych razem za pomocą pary śruby-nakrętka, umożliwiającej zmianę ruchu obrotowego na postępowy. Śruba ramienia manipulatora napędzana jest silnikiem. Dolna część ramienia łączy się z płytą dolną za pomocą przegubu Cardana, natomiast górna część

ramienia łączy się z płytą górną za pomocą przegubu Cardana oraz przegubu obrotowego. Moment obrotowy napędzający śruby wypracowany jest w układzie napędowym z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego. Sterowanie całym obiektem wymaga opracowania szczegółowej struktury układu regulacji silników platformy oraz algorytmu przetwarzania wartości zadanych w formie przemieszczeń i przyspieszeń platformy na sygnały wejściowe regulatorów [4]. Docelowy silnik typu PM BLDC, pracujący w układzie serwonapędu, wymaga określenia parametrów regulatorów prędkości i prądu. Zatem w oprogramowaniu docelowego układu sterowania powinna być możliwość wpływania na parametry regulacji pojedynczego silnika.

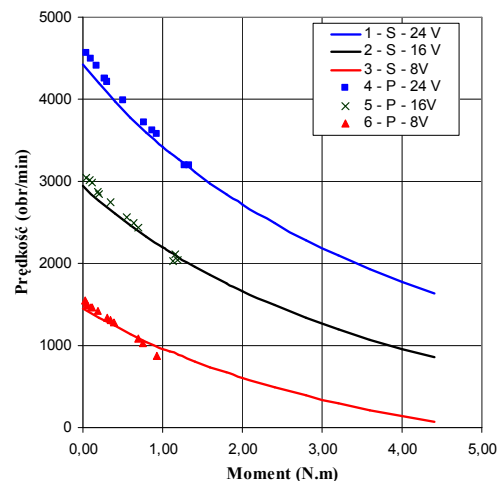
Połączenie dwóch programów komputerowych umożliwiło stworzenie wirtualnego stanowiska badawczego wyposażonego w możliwość sterowania i wizualizacji trójwymiarowego modelu obiektu rzeczywistego. Mankamentem rozwiązania tego rodzaju jest konieczność dokładnego uwzględnienia parametrów obiektu rzeczywistego. Jest to związane z koniecznością wprowadzenia pełnych danych dla modelu numerycznego, z jakiego korzysta oprogramowanie SimMechanics dostępne jako opcja w pakiecie Matlab/Simulink. Ponadto w takim przypadku pojawiają się problemy związane z wykorzystaniem określonych metod numerycznych mogące prowadzić do braku zbieżności algorytmów symulacyjnych np. w sytuacji niewłaściwego potraktowania więzów występujących w układzie.

W budowie modelu komputerowego napędu manipulatora wykorzystano pełny model silnika PM BLDC [6]. Jednak w wyniku integracji dwóch programów komputerowych czasy symulacji sześciosilnikowego napędu platformy znacznie się wydłużyły. Dlatego opracowano model silnika, który umożliwia symulację w stanach statycznych i dynamicznych. Na rysunku 5 przedstawiono zmodyfikowany stałoprądowy model silnika PM BLDC uwzględniający wpływ indukcyjności na prędkość i średnią wartość prądu wejściowego silnika PM BLDC. Różni się on od stałoprądowego modelu silnika wprowadzonym współczynnikiem k_{ch} uwzględniającym wpływ komutacji na charakterystyki mechaniczne silnika [4].

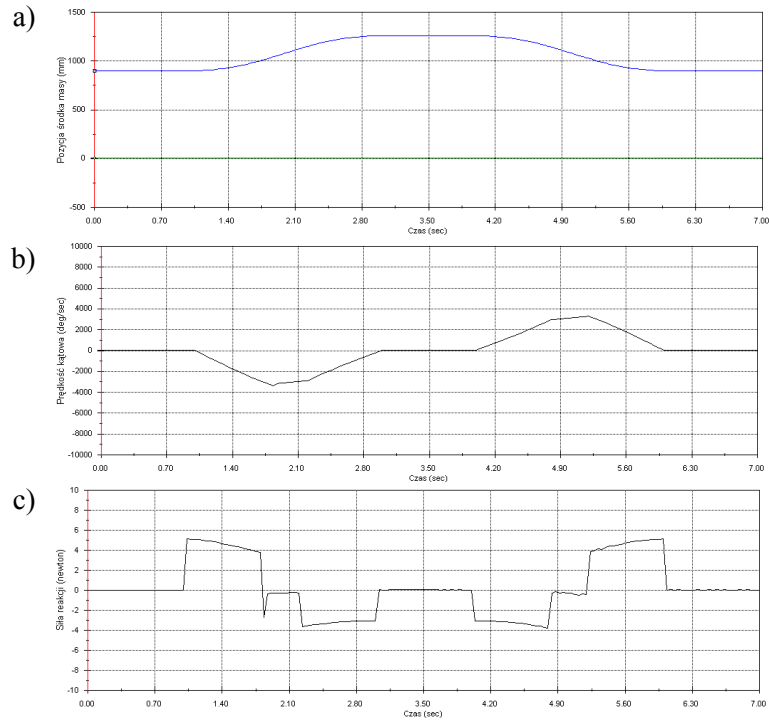


Rys. 5. Zmodyfikowany model stałoprądowy silnika PM BLDC uwzględniający nachylenia charakterystyki mechanicznej k_{ch}

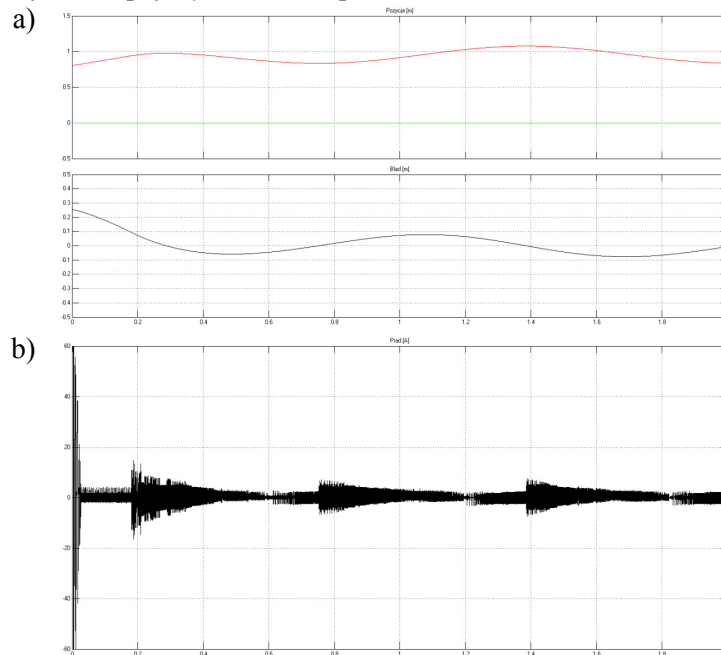
Zmodyfikowany model silnika PM BLDC zwerifikowano porównując charakterystyki mechaniczne uzyskane w wyniku badań laboratoryjnych i komputerowych [5]. Uzyskane charakterystyki mechaniczne, uwzględniające wpływ indukcyjności, są prawie identyczne z charakterystykami mechanicznymi rzeczywistego silnika PM BLDC w zakresie znamionowych momentów obciążenia (rys. 6).



Rys. 6. Charakterystyki mechaniczne silnika uzyskane w wyniku symulacji komputerowej zmodyfikowanego modelu (1, 2, 3) dla trzech napięć zasilania (24V, 16V i 8V) oraz wyniki pomiarów (4, 5, 6) uzyskane dla tych samych napięć



Rys. 7. Symulacja wykonana w programie SolidWorks dla platformy górnej poruszającej się wzdłuż osi Z: a) położenie środka ciężkości płyty górnej w osiach X, Y i Z; b) prędkość kątowna; oraz c) siła obciążająca na pojedynczą śrubę posuwu



Rys. 8. Symulacja w programie Matlab/Simulink dla platformy górnej poruszającej się wzdłuż osi Z: a) położenie środka ciężkości platformy górnej w osiach X, Y i Z oraz różnica pomiędzy zadaną a rzeczywistą wartością długości ramion; b) prąd pobierany z źródła silnika PM BLDC

4. Badania komputerowe

Opracowany model komputerowy umożliwia sterowanie i wizualizację trójwymiarowego modelu obiektu rzeczywistego. Model komputerowy (wykonany w SolidWorks) z opisanymi

właściami mechanicznymi platformy, umożliwił w pierwszym etapie projektowania rzeczywistej platformy wyznaczenie niezbędnych parametrów, które wykorzystano do wyznaczenia nastaw regulatorów układu sterowania platformy. Do głównych informacji uzyska-

nych z modelu wykonanego w programie Solid Works należą masy poszczególnych elementów, momenty bezwładności, siły i naprężenia działające w poszczególnych punktach platformy oraz obszar roboczy platformy. Natomiast model komputerowy wykonany w programie Matlab/Simulink wykorzystano do doboru silników PM BLDC napędzających platformę oraz do określenia algorytmów sterowania platformą [2].

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono wybrane przebiegi zarejestrowane w trakcie symulacji. Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi zarejestrowanie w programie SolidWorks podczas poruszania się platformy do góry i na dół. Natomiast rysunek 8 przedstawia pozycję środka ciężkości płyty górnej w osiach X, Y i Z oraz przebieg zmian błędu układu regulacji wyznaczony jako różnica między wartością zadaną i rzeczywistą długości ramion. Na rysunku 8a widać zmianę pozycji jedynie w osi Y. Przebieg prądu pobieranego z źródła bezszczotkowego silnika prądu stałego przedstawia rys. 8b.

5. Podsumowanie. Wnioski końcowe

W artykule przedstawiono model komputerowy platformy manipulatora równoległego. Przedstawiony model został zbudowany w oparciu o oprogramowanie SolidWorks oraz Matlab/Simulink. Cechą wspólną obu programów jest zaimplementowany model komputerowy wyznaczający zadanie odwrotne kinematyki platformy górnej, polegające na wyznaczeniu parametrów członów i przegubów platformy w celu uzyskania odpowiedniej zmiany pozycji i orientacji w przestrzeni charakterystycznego punktu platformy.

Model zbudowany w programie SolidWorks pozwala przeprowadzić badania z zakresu kinematyki, dynamiki i wytrzymałości mechanicznej elementów platformy. Dodatkowo model wykorzystano do wizualizacji trójwymiarowego ruchu platformy podczas analizy algorytmów sterowania manipulatora równoległego. Część napędową modelu zamodelowano w program Matlab/Simulink, który wraz z bibliotekami SimMechanics oraz SimPowerSystems, pozwala na symulację oraz analizę skomplikowanych systemów mechanicznych, układów elektrycznych oraz układów sterowania i regulacji. Przewiduje się kontynuację prac nad udoskonalaniem modelu komputerowego platformy manipulatora równoległego. Opracowane algo-

rytmy sterowania zostaną zaimplementowane w układzie sterowania rzeczywistej platformy poprzez układ szybkiego prototypowania DS 1104.

Praca finansowa przez NCN w ramach projektu badawczego 5142/B/T02/2011/40.

6. Literatura

- [1]. Domoracki A., Hetmańczyk J., Krykowski K.: *Układ sterowania bezszczotkowego silnika prądu stałego o mocy 3.6 kW*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, Nr 64, Katowice 2002.
- [2]. Gawleta Ł. *Model wielosilnikowego napędu z bezszczotkowymi silnikami prądu stałego*. Praca dyplomowa. Gliwice 2012.
- [3]. Honczarenko J.: *Wprowadzenie do robotyki*. Szczecin 1994.
- [4]. Krykowski K., Hetmańczyk J., Stenzel T., Sajkowski M.: *Model silownika z silnikiem PM BLDC zastosowanego do manipulatora równoległego – analiza układu*. XV Sympozjum PPEEm 2012, Gliwice 2012, pp: 80-83.
- [5]. Krykowski K., Hetmańczyk J.: *Constant Current Models of Permanent Magnet Brushless Direct Current Motor*. 13th International Symposium of Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering and Doctoral School of Energy and Geotechnology II, Pärnu, Estonia 2013, pp: 175-179.
- [6]. Krykowski K.: *Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym analiza, właściwości, modelowanie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [7]. Morecki A., Knapczyk J.: *Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów*. WNT Warszawa 1999.
- [8]. Niederliński A.: *Roboty Przemysłowe*. WSiP, Warszawa 1981.
- [9]. Sajkowski M., Stenzel T., Hetmańczyk J., Grzesik B., Staśko A.: *Analiza problemów implementacyjnych układu sterowania na przykładzie zredukowanego elektromechanicznego modelu manipulatora równoległego*. XV Sympozjum PPEEm 2012, Gliwice 2012, pp: 168-171.

Autorzy

dr inż. Janusz Hetmańczyk
 prof. dr hab. inż. Krzysztof Krykowski,
 mgr inż. Łukasz Gawleta
 Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki
 Napędu Elektrycznego i Robotyki
 ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice
 e-mail: Krzysztof.Krykowski@polsl.pl
 e-mail: Janusz.Hetmanczyk@polsl.pl
 e-mail: gawleta@interia.pl