

Janusz Hetmańczyk, Maciej Sajkowski, Tomasz Stenzel
Politechnika Śląska, Gliwice

SYSTEM STEROWANIA MANIPULATOREM RÓWNOLEGLYM PRZEZNACZONY DO SYMULACJI WYBRANYCH ŚRODKÓW TRANSPORTU

THE CONTROL SYSTEM OF PARALLEL MANIPULATOR DESIGNED TO SIMULATION OF SOME MEANS OF TRANSPORT

Streszczenie: Artykuł zawiera opis systemu sterowania stanowiska badawczego wyposażonego w manipulator równoległy. Do napędu tego manipulatora wykorzystano bezszczotkowe silniki prądu stałego (PM BLDC). System sterowania manipulatora równoległego oparto na oprogramowaniu Matlab/Simulink współpracującym z platformą czasu rzeczywistego xPC Target, stanowiącej rozszerzenie pakietu Matlab/Simulink. Komunikację między jednostką sterującą a silnikami napędzającymi śruby siłowników zapewnia magistrala CAN. W artykule przedstawiono również opis stanowiska oraz zaprezentowano możliwości wykorzystania stanowiska w dalszych pracach naukowo – badawczych.

Abstract: The paper contains a description of a control system of the laboratory stand equipped with a manipulator parallel. Brushless DC motors (PM BLDC) were utilized to drive the manipulator. The parallel manipulator control system software is based on Matlab/Simulink cooperating with the real-time platform xPC target, which is the extension of the Matlab/Simulink package. Communication between the control unit and the motors, driving the ball screws of the actuators, is provided by a CAN bus. The article presents a description of the laboratory stand and explains the possibilities of using this equipment in the further development of scientific research.

Słowa kluczowe: manipulator równoległy, napęd PM BLDC, system sterowania czasu rzeczywistego, symulator warunków pracy

Keywords: parallel manipulator, the PM BLDC drive, real-time control system, simulation of vehicle working conditions

1. Wstęp

Manipulator równoległy, oparty na kinematyce platformy Stewarta-Gougha, jest szczególnym przypadkiem układu mechanicznego o zamkniętym łańcuchu kinematycznym. Tego rodzaju konstrukcja umożliwia realizację specjalistycznych aplikacji na przykład w formie symulatorów lotu statków powietrznych lub ruchu pojazdów samochodowych. Przegląd konstrukcji i zastosowań manipulatorów równoległych można znaleźć między innymi w [3]. Celem publikacji jest zaprezentowanie opracowanej konstrukcji elektromechanicznego manipulatora równoległego od strony zastosowanej metody sterowania i z perspektywy dalszych prac badawczych przy wykorzystaniu zrealizowanego stanowiska.

Badania symulacyjne umożliwiają stosunkowo łatwo i kompleksowo przeprowadzenie obliczeń komputerowych, ale to badania laboratoryjne ostatecznie ukazują ilościową i jakościową weryfikację rozważanego zagadnienia. Koszt wy-

konania prototypowego urządzenia, obwodów zadawania oraz układów sterowania i regulacji zazwyczaj znacznie przekraczają koszt zakupu specjalistycznego oprogramowania i badań symulacyjnych. Dlatego ważne jest posiadanie nowoczesnego badawczego stanowiska laboratoryjnego, które umożliwi pełną weryfikację przeprowadzonych badań symulacyjnych.

Nowoczesne stanowisko laboratoryjno-badawcze powinno zapewnić również możliwość zmiany struktury układu sterowania oraz być wyposażone w układ pomiarowy umożliwiający archiwizację wybranych danych pomiarowych i przebiegów czasowych. Prezentowane w niniejszym artykule stanowisko laboratoryjne manipulatora równoległego spełnia wszystkie wyżej wymienione kryteria, ale co najważniejsze pozwala na dalszy rozwój pod kątem specjalistycznych aplikacji badawczych, jak również w kierunku zastosowań komercyjnych.

2. Stanowisko laboratoryjne

Stanowisko badawcze manipulatora składa się z nieruchomej podstawy (dolnej) i ruchomej platformy (górnej), połączonych ze sobą za pomocą sześciu niezależnych siłowników liniowych o minimalnej długości każdego $L_{\min} = 890\text{mm}$ i translacji $\Delta l = 335\text{mm}$. Nieruchoma podstawa manipulatora oraz platforma górna zostały wykonane na planie sześciokąta. Długości krótszych boków sześciokąta wynoszą $d = 220\text{mm}$, a dłuższych $D = 871\text{mm}$ (rys. 1). Każdy z 6 siłowników (ramion) składa się z dwóch części połączonych za pomocą śruby i nakrętki kulowej, umożliwiającej zmianę ruchu obrotowego na posuw. Śruba ramienia manipulatora napędzana jest bezszczotkowym silnikiem prądu stałego (PM BLDC). Zarówno dolna jak i górna część ramienia połączona jest odpowiednio z podstawą oraz płytą górną za pomocą przegubu. Zmianę położenia platformy uzyskuje się dzięki odpowiedniej zmianie długości każdego z ramion.



Rys. 1. Manipulator równoległy jako stanowisko laboratoryjne

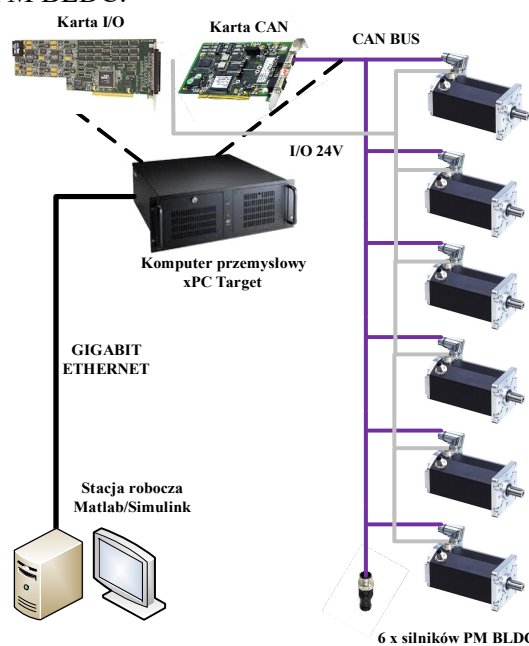
W układzie napędowym zastosowano silniki PM BLDC o mocy 330 W, napięciu zasilania 24V ze zintegrowanym układem sterowania i regulacji silnika. Układ ten umożliwia zadawanie wybranych parametrów takich jak prąd maksymalny ciągły i chwilowy, prędkość obrotową, kierunek i liczbę obrotów oraz innych parametrów. Komunikacja z nadrzędnym układem sterowania całej platformy odbywa się za pośrednictwem magistrali CAN [1].

3. System sterowania stanowiskiem

Ogólną architekturę systemu sterowania stanowiska manipulatora równoległego przedstawiono na rys. 2. System sterowania oparto na oprogramowaniu Matlab/Simulink współpracującym z platformą czasu rzeczywistego xPC

Target stanowiącą rozszerzenie pakietu Matlab/Simulink [5].

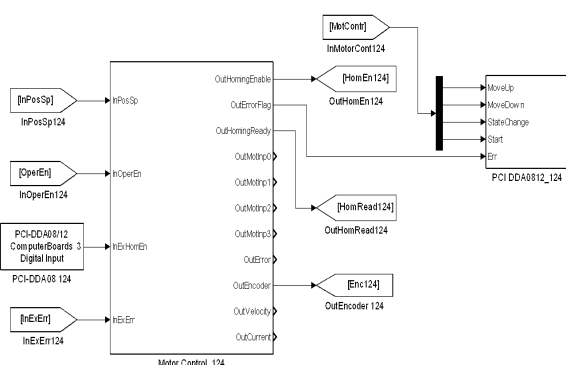
Głównymi elementami architektury sterowania jest komputer przemysłowy realizujący funkcję sterowania manipulatorem równoległym w czasie rzeczywistym oraz stacja robocza przeznaczona do modelowania struktury systemu sterowania w programie Matlab/Simulink. Stacja ta wykorzystywana jest również do wizualizacji oraz rejestracji danych pomiarowych w trakcie działania systemu. Komputery wchodzące w skład systemu sterowania połączone łączem sieciowym w standardzie Gigabit Ethernet o przepustowości 1Gbit/sekundę. W komputerze przemysłowym zainstalowano karty rozszerzeń w formie interfejsu magistrali CAN oraz karty wejść/wyjść cyfrowych i wyjść analogowych (karta I/O). Magistralą CAN połączono komputer sterujący z sześcioma silnikami PM BLDC.



Rys. 2. Architektura systemu sterowania stanowiska badawczego

Sterowanie manipulatorem zaimplementowano w oprogramowaniu Matlab/Simulink pracującym w czasie rzeczywistym na platformie xPC Target, będącej dedykowanym systemem operacyjnym, umożliwiającym sterowanie i realizację pomiarów w oparciu o sprzęt komputerowy klasy PC. W przypadku tej metody najważniejszym elementem procesu projektowania oprogramowania sterującego silnikami było opracowanie w środowisku Matlab/Simulink szkieletu oprogramowania obsługującego wysłanie i odbiór sekwencji ramek protokołu CANopen.

Zastosowane rozwiązanie należy do kategorii metod szybkiego prototypowania systemów i układów sterowania określanej jako „software in the loop”. W takim przypadku oprogramowanie sterownika jest testowane w rzeczywistym systemie. Kod programu jest uzyskiwany w sposób automatyczny na podstawie formalnego opisu bazującego na jednym z języków modelowania. W projekcie główną część sterownika zaprojektowano w formie opisu maszyny stanów w języku UML. Kodowanie sterownika zrealizowano przy wykorzystaniu narzędzia Stateflow stanowiącego rozszerzenie oprogramowania Matlab/Simulink.

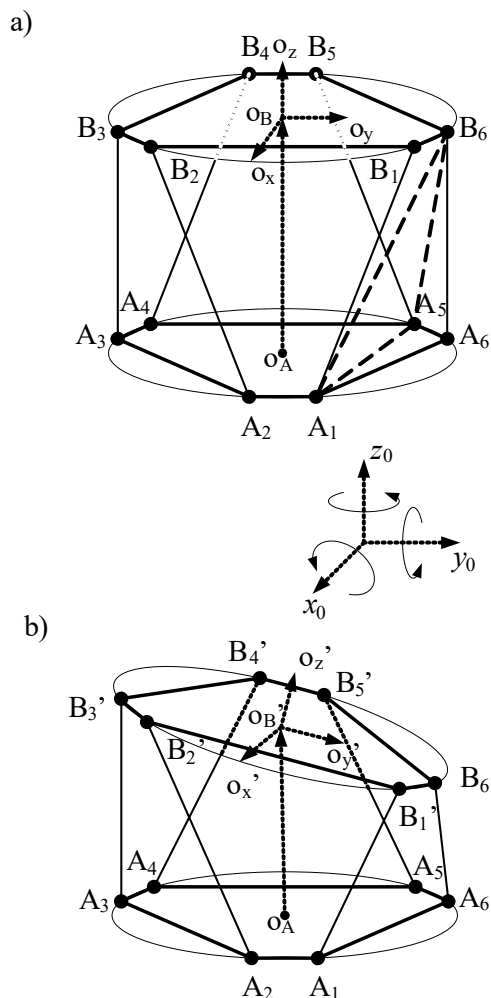


Rys. 3. Blok sterowania pojedynczym bezszczotkowym silnikiem prądu stałego zrealizowany w formie modelu w programie Matlab/Simulink

Na rys. 3 zaprezentowano fragment opracowanej w środowisku Matlab/Simulink struktury układu sterowania. Kompletny układ sterowania składa się z sześciu bloków analogicznych do przedstawionego na rys. 3. Każdy z bloków realizuje sterowanie pojedynczym silnikiem PM BLDC. Głównym parametrem wejściowym dla bloku sterowania jest wartość docelowej pozycji napędu, wyrażona w formie docelowej liczby impulsów enkodera absolutnego, w który wyposażony jest zastosowany silnik. Blok sterowania silnika otrzymuje również informacje o stanie pracy i błędach pozostałych napędów, dzięki czemu stanowisko z manipulatorem równoległym może bezpiecznie pracować bez zagrożenia dla obsługi oraz mechanicznej konstrukcji samego urządzenia.

Wartości zadanego przemieszczenia dla poszczególnych siłowników są wypracowywane na podstawie odwrotnego zadania kinematyki pozwalającego na wyznaczenie długości każdego z sześciu członów zamkniętego łańcucha kinematycznego na podstawie docelowej wartości wektorów przemieszczenia w trzech stopniach swobody oraz na podstawie wartości ką-

tów obrotu w pozostałych trzech stopniach swobody.



Rys. 4. Struktura kinematyczna opracowanego manipulatora równoległego: a) w pozycji maksymalnej translacji każdego z siłowników liniowych; b) w pozycji odpowiadającej przykładowym wartościom translacji wybranych siłowników liniowych

Na rys. 4a zaprezentowano widok struktury kinematycznej opracowanego manipulatora równoległego dla maksymalnej translacji siłowników, zaś na rys. 4b przedstawiono przykładową pozycję tego manipulatora stanowiącą efekt zmian długości siłowników.

W celu rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki dla manipulatora równoległego przyjęto współrzędne punktu O_B , będącego geometrycznym środkiem górnej platformy manipulatora. Punkt ten może przemieścić się w trzech osiach. Przemieszczenia te symbolizują na rys. 4b wektory: $O_B O_X$, $O_B O_Y$, $O_B O_Z$, ponadto wokół każdego z tych wektorów może nastąpić obrót

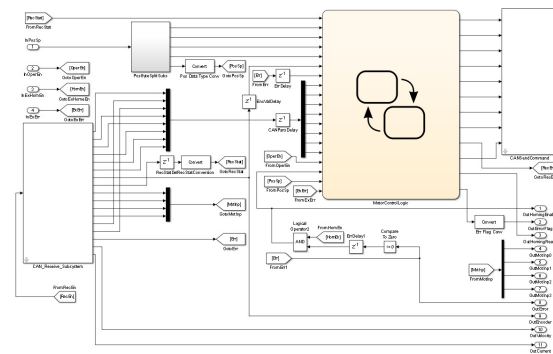
wyrażony w formie widocznych w prawym dolnym rogu kątów nachylenia (wokół osi x_0) - ψ , odchylenia (wokół osi y_0) - θ i obrotu (wokół osi z_0) - ϕ . Pełny opis przemieszczenia płaszczyzny górnej platformy manipulatora uzyskuje się na podstawie złożenia trzech macierzy translacji (1) oraz trzech macierzy obrotu (2).

$$\begin{aligned} Trans_{x,x_0} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ Trans_{y,y_0} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ Trans_{z,z_0} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Rot_{x,\psi} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}, \\ Rot_{y,\theta} &= \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, \\ Rot_{z,\phi} &= \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

W wyniku przeprowadzenia każdego z sześciu elementarnych przekształceń otrzymuje się współrzędne punktu $O_{B'}$ oraz wektory $O_{B'}O_{X'}$, $O_{B'}O_{Y'}$, $O_{B'}O_{Z'}$. Analogicznie operację należy przeprowadzić dla każdego wierzchołka wielokąta górnej platformy ($B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$), a dokładnie dla odpowiadających im punktów środków przegubów łączących siłowniki liniowe z górną platformą. Dla otrzymanych nowych wartości współrzędnych górnej platformy oblicza się długość wektorów A_n, B_n , gdzie $n=1$ do 6, dla każdego siłownika liniowego. Różnica otrzymanej wartości i minimalnej długości siłownika liniowego stanowi docelową wartość

translacji przekazywaną jako parametr do opisywanego układu sterowania każdego siłownika liniowego.



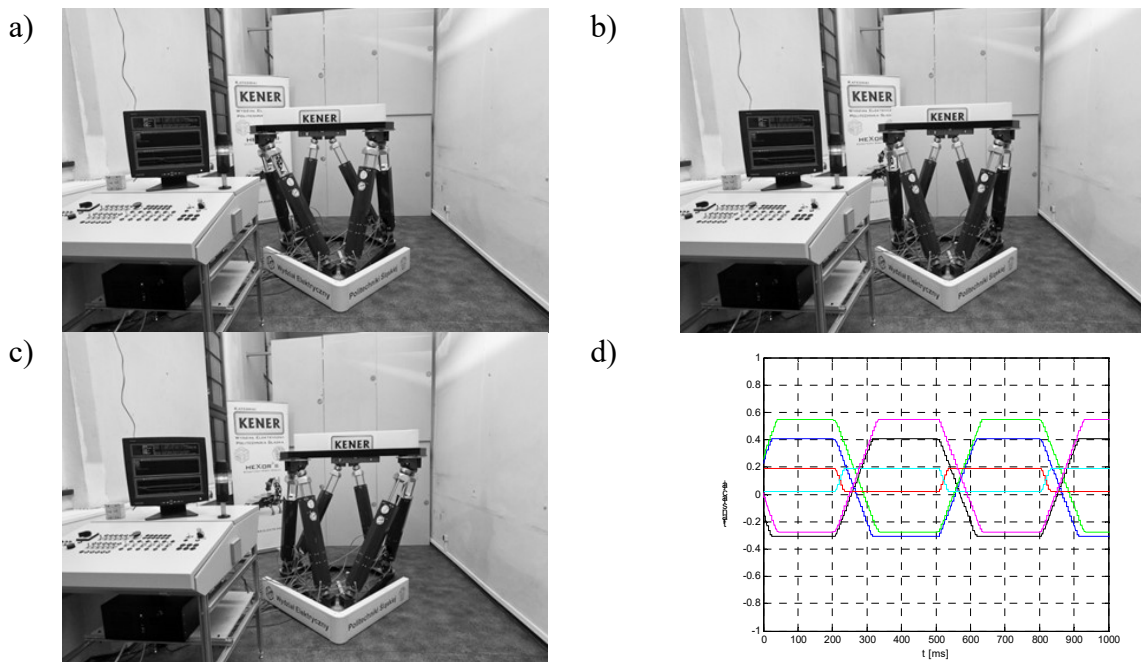
Rys. 5. Wewnętrzna struktura bloku sterowania pojedynczym silnikiem PM BLDC z obsługą nadawania i odbioru ramek interfejsu CAN oraz automatem stanów implementującym protokół CANopen

Przedstawiona na rys. 5 wewnętrzna struktura układu sterowania pojedynczym silnikiem składa się z widocznego z lewej strony modułu obsługi odbioru ramek interfejsu CAN. Dane pochodzące z tego elementu, łącznie z uprzednio wspomnianymi parametrami sterowania pojedynczym silnikiem, są przekazywane do maszyny stanów skończonych, w której zaimplementowano obsługę wybranych sekwencji poleceń protokołu CANopen. Na wyjściu maszyny stanów generowane są dane trafiające do widocznego w prawej części rysunku bloku obsługi transmisji interfejsu CAN.

4. Badania

Opracowane stanowisko laboratoryjne uruchomiono i przebadano z zerowym obciążeniem oraz z różnymi wartościami masy umieszczonej na górnej platformie manipulatora równoległego. Obciążenie zmieniano w zakresie od 10 do 60 kg. Badania przeprowadzono zarówno dla poszczególnych sześciu stopni swobody, jak również dla ich wybranego złożenia.

Na rys. 6a do 6c przedstawiono poszczególne fazy ruchu manipulatora równoległego w trakcie translacji poziomej. Rysunek 6d przedstawia przebiegi zarejestrowane z enkoderów silników napędzających poszczególne siłowniki liniowe.



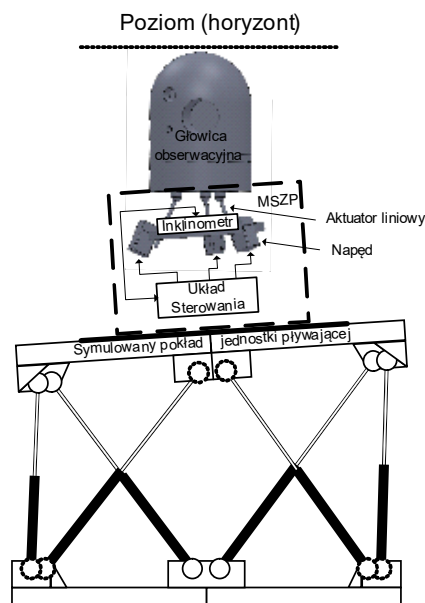
Rys. 6. Działanie manipulatora równoległego podczas pracy w prawo i w lewo (oś Y): a) – c) kolejne fazy ruchu; d) przebieg translacji zarejestrowany podczas eksperymentu

5. Wykorzystanie stanowiska

Opracowane stanowisko badawcze może służyć zarówno do prowadzenia prac badawczych lub być z powodzeniem wykorzystywane w procesie dydaktycznym. Przedmiotem dalszych prac na bazie opisywanego stanowiska mogą być zaawansowane algorytmy sterowania napędami wielosilnikowymi w szczególności w odniesieniu do manipulatora równoległego. Innymi kierunkami prac może być opracowanie algorytmów sterowania wymuszających odpowiedni ruch platformy, opracowanie dodatkowych układów komunikacji i oprogramowania służącego do wizualizacji pracy platformy w różnych środowiskach trójwymiarowego modelowania graficznego.

Stanowisko, na dzień pisania artykułu, jest wykorzystywane w badaniach innych układów jako symulator zmiennych warunków pracy. W ramach projektu „Opracowanie, wykonanie i badania Zintegrowanego Systemu Kierowania Akcją Ratowniczą z wykorzystaniem innowacyjnych technologii Rapid Manufacturing” stanowisko to będzie wykorzystane do analizy możliwości realizacji Modułu Stabilizacji i Zadawania Pozycji (MSZP) głowicy obserwacyjnej (rys. 7). Celem badań jest określenie sposobu realizacji układu stabilizacji i zadawania pozycji optoelektronicznej głowicy obserwacyjnej stanowiący element Zintegrowanego

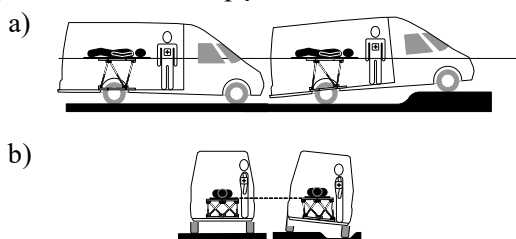
Systemu Kierowania Akcją Ratowniczą w warunkach symulujących falowanie morza. MSZP będzie zapewniał stabilizację neutralnego (poziomego) ustawienia zmechanizowanej platformy obrotowej głowicy obserwacyjnej względem linii horyzontu.



Rys. 7. Moduł MSZP na stanowisku badawczym symulującym warunki pracy na morzu

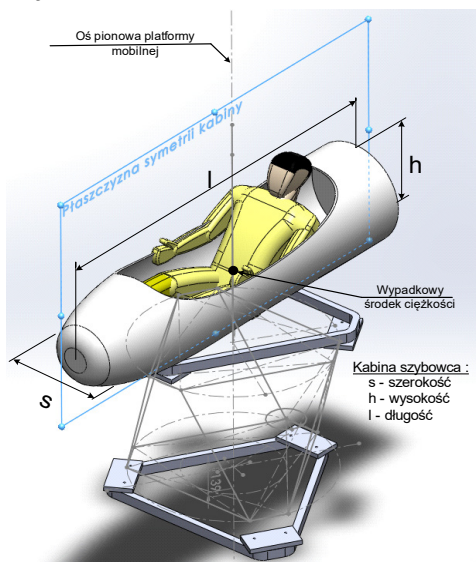
Prowadzone są również prace nad wykorzystaniem stanowiska manipulatora do realizacji „Urządzenia do stabilizacji pozycji pacjenta

(USPP)”. Urządzenie (USPP) powinno zapewnić stabilizację pozycji pacjenta, przed niekorzystnym wpływem gwałtownych przeciążeń, drgań, a w konsekwencji przemieszczeń i zmiany pozycji ułożenia ciała podczas transportu (rys. 8). W artykule [2] przedstawiono budowę, zasadę działania USPP oraz wyniki badań potwierdzających, że stanowisko manipulatora może być wykorzystywane jako symulator drgań pojazdów ratunkowych. Eliminacja drgań jest możliwa na poziomie modyfikacji algorytmu sterowania napędów PM BLDC.



Rys. 8. Sposób stabilizacji pozycji pacjenta [Nr Patentu 214937]: a) widok z boku - pokonywanie poprzecznej nierówności drogi, b) widok z tyłu - pokonywanie wzdłużnej przeszkody

Opisywane stanowisko badawcze jest również wykorzystane do symulacji ruchu statków powietrznych (rys. 9). Prowadzone są prace przygotowawcze do instalacji systemu zobrazowania lotu szybowcem współpracującego z istniejącym już układem sterowania [4].



Rys. 9. Koncepcja realizacji symulatora lotu szybowcem na bazie opracowanego stanowiska badawczego manipulatora równoległego

6. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w artykule stanowisko badawcze może zostać wykorzystane do badania innych

układów, w których manipulator równoległy będzie wykorzystany jako symulator różnych warunków pracy np. drgań występujących w pojazdach transportowych. Opisane stanowisko badawcze manipulatora równoległego zostało wytworzone w ramach projektu finansowanego przez NCBiR o nr 5142/B/T02/2011/40.

Sterowanie stanowiskiem wykonano z wykorzystaniem oprogramowania Matlab/Simulink pracującym w czasie rzeczywistym na platformie xPC Target. Tworzenie układów sterowania z poziomu Matlab/Simulink jest dużym ułatwieniem oraz pozwala na wielokrotne modyfikowanie metody sterowania. Bogata architektura układów wejść/wyjść pozwala na realizację nie tylko sterowania pojedynczego napędu, ale umożliwia sterowanie kilkoma układami (napędami) jednocześnie. Szybkość komunikacji układu sterowania z pozostałymi podzespołami zapewnia magistrala CAN. Wykorzystanie wysokiej klasy karty sterującej w połączeniu z opracowanym oprogramowaniem zapewnia rejestrację wszystkich wielkości elektrycznych opisujących działanie napędu, jak i przekształtnika.

7. Literatura

- [1]. Augustynek P.: „CAN w napędach – cz. IV. Silniki Dunkermotoren z łącznością CAN”, *Napędy i Sterowanie*, nr 6, 2007.
- [2]. Hetmańczyk J., Sajkowski M., Stenzel T.: „Stanowisko laboratoryjne symulatora warunków pracy urządzenia do stabilizacji pozycji pacjenta”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 105, str. 107-112, 1/2015.
- [3]. Hetmańczyk J., Stenzel T., Grzesik B.: „Selected aspects of design and modelling of linear actuator based on PM BLDC motor”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6, str. 100-107, 2015.
- [4]. Urbaniec S.: „Analiza porównawcza elementów systemu zobrazowania dla symulatora lotu”, Praca dyplomowa, Gliwice 2015.
- [5]. <http://www.mathworks.com/help/index.html>.

Autorzy

dr inż. Janusz Hetmańczyk, dr inż. Maciej Sajkowski, dr inż. Tomasz Stenzel
 Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki
 ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice
 E-mail: Janusz.Hetmanczyk@polsl.pl
 Maciej.Sajkowski@polsl.pl
 Tomasz.Stenzel@polsl.pl