

Danuta JASIŃSKA-CHOROMAŃSKA, Wojciech CREDO, Ksawery SZYKIEDANS, Łukasz RZESZOTEK, Jan SEMENIUK, Marcin ZACZYK, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, Politechnika Warszawska, Warszawa

PROBLEMY PROJEKTOWANIA NAPĘDÓW DO UKŁADU WSPOMAGANIA RUCHU OSÓB NIEPEŁNOSPRAWNYCH

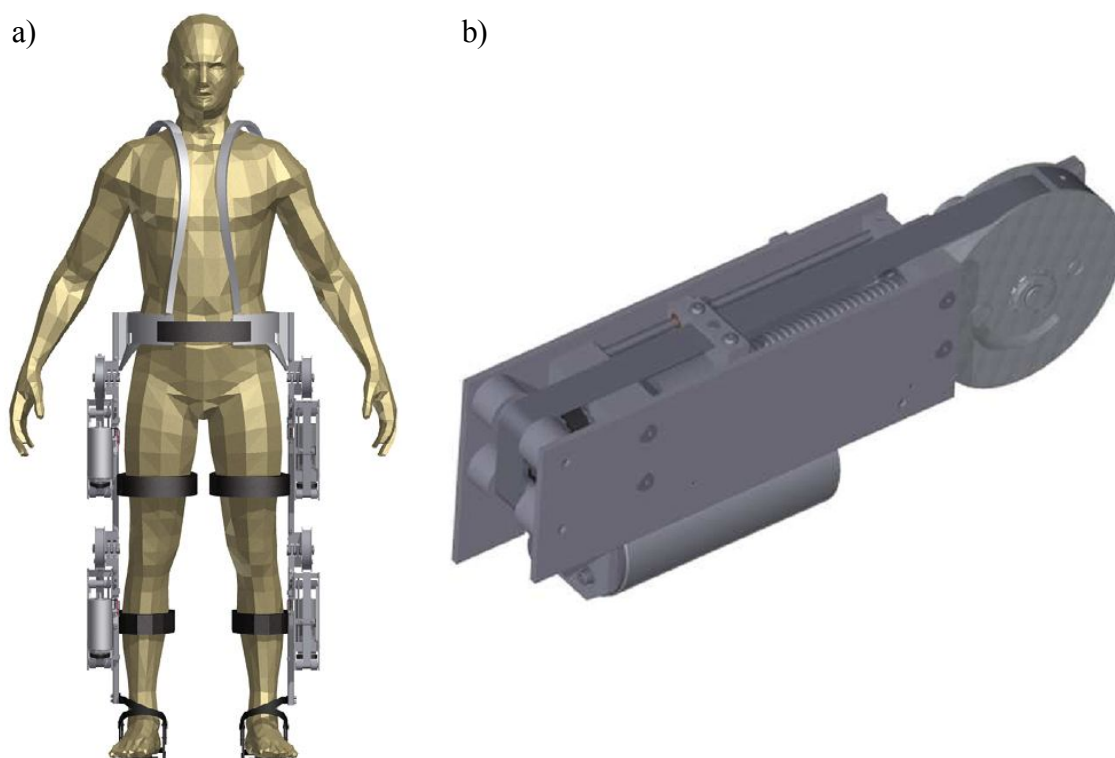
Streszczenie. Celem projektu było opracowanie i zbudowanie oryginalnych technicznych modeli napędów do zastosowania w Systemie Pionizacji i Wspomagania Ruchu (SPiWR). System ten przeznaczony jest dla osób z niedowładem kończyn dolnych, zgodnie z najnowszymi tendencjami występującymi w dziedzinie bioniki[8,9]. W proponowanym rozwiązaniu osoba niepełnosprawna porusza się dzięki zastosowaniu mechanicznego układu do którego mocowane są kończyny dolne, zastępującego ich funkcje poprzez wymuszony ruch odtwarzający w znacznym zakresie naturalny ruch kończyn dolnych[2,3,4]. W artykule przedstawiono problematykę doboru układów napędowych systemu.

1. WPROWADZENIE

Projekt jest adresowany do osób z niedowładem kończyn dolnych, które do przemieszczania się używają na ogół wózków inwalidzkich. Ten sposób poruszania się ma wiele zalet, z których największą jest poczucie bezpieczeństwa osoby niepełnosprawnej wynikające ze stabilności pojazdu. Korzystanie z wózka inwalidzkiego jest jednak także źródłem istotnych ograniczeń. Osoba na wózku patrzy na otaczający świat z innej perspektywy, niż osoby sprawne. Wiele elementów infrastruktury życiowej znajduje się poza zasięgiem jej wzroku i rąk. Można tu wymienić choćby punkty obsługi klientów w urzędach, półki i regały sklepowe, kasy czy też automaty sprzedające produkty i usługi. W wymienionych przypadkach położenie podstawowych elementów obsługi nie jest dostosowane do usytuowania osoby niepełnosprawnej.

Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest tzw. pionizacja czyli ustawienie w pozycji pionowej osób z bezwładem kończyn dolnych. Istnieje wiele znanych rozwiązań technicznych służących do pionizacji pacjentów stosowanych zależnie od ich stanu zdrowia. Są to m.in.: łóżka pionizacyjne, urządzenia pionizacyjne, w szczególności dla dzieci, mobilne stoły pionizacyjne, wózki pionizujące, a także parapodia: statyczne, dynamiczne, mobilne i wertykalne.

Niektóre z przyrządów mogą być wykorzystane do przemieszczania osób niepełnosprawnych, ale wymagana jest do tego pomoc innej osoby. Samodzielne poruszanie się jest możliwe przy użyciu parapodium dynamicznego, jednak wyłącznie po powierzchniach płaskich, bez możliwości pokonywania jakichkolwiek przeszkód.



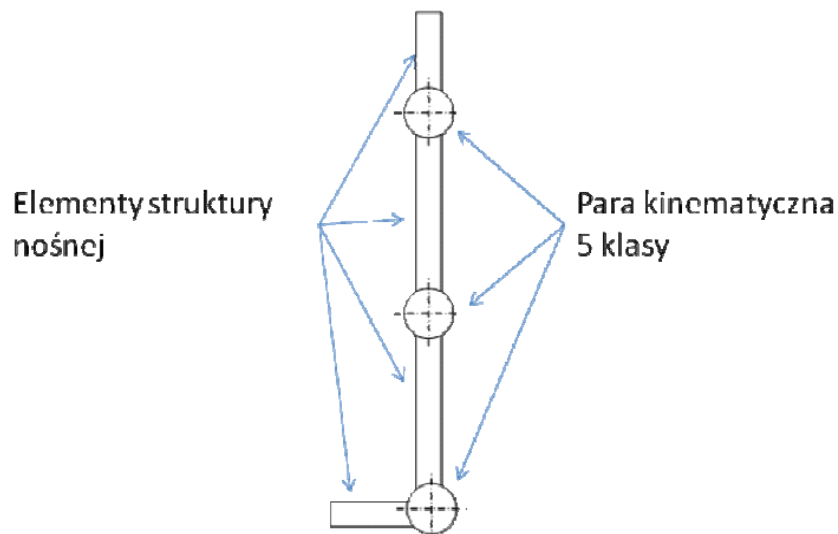
Rys. 1. System pionizacji i wspomagania ruchu
a) Szkielet nośny z układem napędowym b) Układ napędowy

Celem Systemu Pionizacji i Wspomagania Ruchu w którym zastosowano układ napędowy, będący tematem tego artykułu, jest zwiększenie możliwości użytkownika podczas samodzielnego poruszania się. System umożliwia nie tylko wykonanie podstawowych czynności jak wstawanie i siadanie, ale również poruszanie się po schodach oraz chodzenie po powierzchni o różnym stopniu nachylenia. Dzięki temu rozwiązaniu, osoby sparaliżowane mogą samodzielnie wykonywać czynności, które do tej pory były dla nich niedostępne, co wpływa pozytywnie na ich funkcjonowanie w społeczeństwie.

2. WYMAGANIA DLA UKŁADU NAPĘDOWEGO

Wymagania ogólne

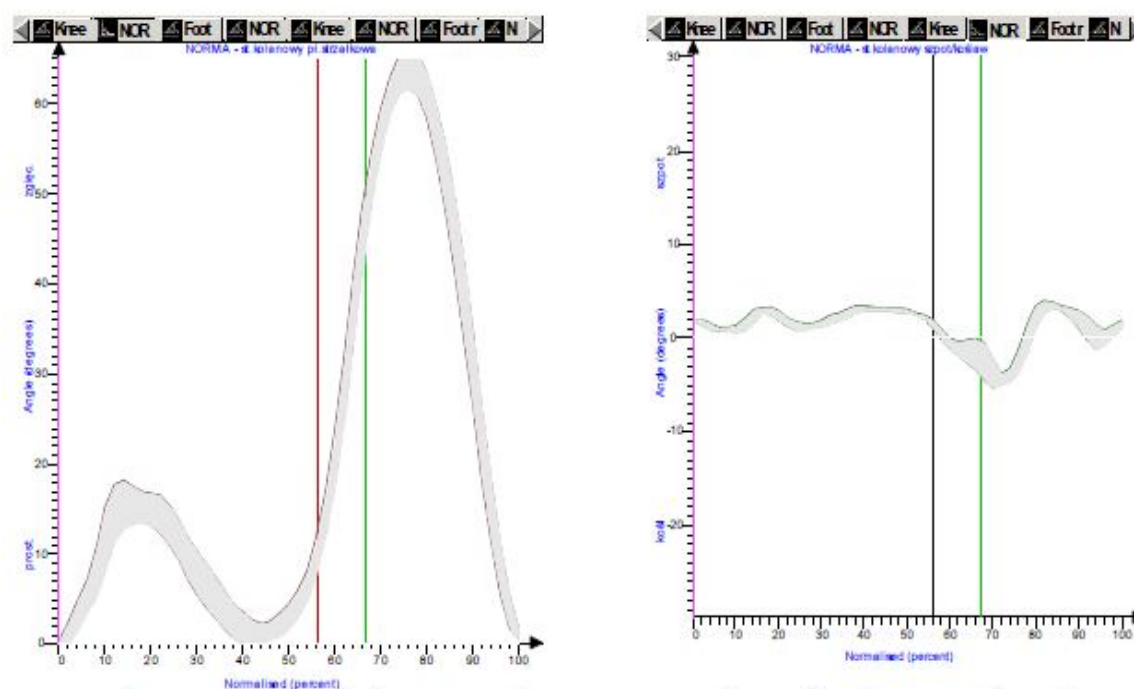
Najważniejszym zespołem całego systemu wspomagania ruchu jest układ napędowy zaprojektowany specjalnie do tego urządzenia[6]. Wstępna koncepcja kinematyczna układu wspomaganie chodu osoby niepełnosprawnej zakłada połączenie poszczególnych członów struktury SPIWR przegubami jednoosiowymi (Rys.)[7]. Taki układ w uproszczeniu imituje ruchy kończyn zdrowego człowieka[9]. Z punktu widzenia zadania zdefiniowania podstawowych wymagań dla napędów istotna jest analiza przemieszczeń katowych w poszczególnych stawach, w trzech płaszczyznach: strzałkowej, czołowej i poprzecznej. W projekcie SPIWR uwagę skupiono głównie na odzwierciedleniu ruchów w płaszczyźnie strzałkowej, ze względu na fakt, że osie wszystkich przegubów jednoosiowych konstrukcji są przybliżeniu prostopadłe do tej płaszczyzny.



Rys. 2. Układ kinematyczny jednej strony SPIWR przyjęty do analizy wymagań

W celu zdefiniowania podstawowych wymagań stawianych napędowi przeprowadzono analizę kinematyczną przemieszczeń poszczególnych członów i przegubów zachodzących w czasie chodu w płaszczyźnie strzałkowej.

Na rys. 3 przedstawiono wg [1] przebiegi względnych przemieszczeń katowych zachodzących kolejno w stawie biodrowym, kolanowym i skokowym w płaszczyźnie strzałkowej w zależności od % cyklu chodu.



Rys. 3. Kinematyka stawu biodrowego, kolanowego i skokowego w płaszczyźnie strzałkowej w zależności od % cyklu chodu; wg [1]

W przypadku zdrowego człowieka przyjmuje się powszechnie, że średnia prędkość chodu jest równa 5km/h ($\approx 1,4\text{m/s}$). W przypadku osoby niepełnosprawnej, posługującej się projektowanym urządzeniem SPIWR, prędkość można określić na poziomie

maksymalnym równym $2,5 \text{ km/h}$ ($\approx 0,7 \text{ m/s}$). Szacunkowa długość jednego kroku człowieka wynosi około $0,5\text{-}0,6 \text{ m}$. 100% cyklu chodu odpowiada sytuacji postawienia dwóch kolejnych kroków.

Na podstawie przytoczonych powyżej danych łatwo oszacować, że pełny cykl chodu osoby wyposażonej w urządzenie SPIWR może trwać około $1,4\text{-}1,7 \text{ s}$. Powyższe dane w zestawieniu z przebiegami przemieszczeń kątowych (rys. 3) są punktem wyjścia do oszacowania maksymalnych prędkości kątowych ruchu w poszczególnych przegubach. Wyznaczone na tej podstawie wartości przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Szacunkowe wartości prędkości obrotowych w poszczególnych stawach podczas chodu

Staw	Maksymalne przemieszczenie kątowe	Czas przemieszczenia [% cyklu chodu]	Czas [s]	Prędkość obrotowa [obr/min]
Biodrowy	45°	29	$0,4 - 0,5$	$15 - 18,8$
Kolanowy	65°	22	$0,3 - 0,4$	$27 - 36$
Skokowy	26°	22	$0,3 - 0,4$	$10,8 - 14,4$

W przypadkach, gdy wykonywane są ruchy innego typu, zakresy kątowe ruchu w poszczególnych stawach mogą być odpowiednio większe. W tabeli 2 przedstawiono szacunkowe wartości zakresów kątowych ruchu w poszczególnych stawach w trakcie wchodzenia lub schodzenia ze schodów.

Tab. 2. Zestawienie przybliżonych zakresów ruchu w poszczególnych stawach rozpatrywanych w płaszczyźnie strzałkowej podczas wchodzenia i schodzenia ze schodów

Staw	Zakres ruchu kąтового przy wchodzeniu na schody	Zakres ruchu kąтового przy schodzeniu ze schodów
Biodrowy	70°	30°
Kolanowy	100°	90°
Skokowy	30°	50°

Oszacowanie momentów rozwijanych przez układy napędowe

Przyjęto, że największe obciążenie napędów stawu kolanowego zaistnieje w fazie wspomagania czynności wstawiania pacjenta z pozycji siedzącej. Rozpatrzmy przypadek najtrudniejszy, w którym zakładamy, że napędy układów wspomagania dwóch stawów kolanowych będą musiały pokonać moment statyczny wynikający z działania $\frac{3}{4}$ siły ciężkości ciała człowieka na ramieniu równym długości kości udowej. Dla zbadania przypadku granicznego założmy również, że osoba wstająca nie wykonuje w trakcie wstawiania, naturalnego dla zdrowego człowieka, przenoszenia środka ciężkości ciała ku przodowi poprzez pochylanie tułowia. Obliczenia wykonano dla następujących danych:

- maksymalna masa osoby: $m = 120 \text{ kg}$
- długość kości udowej osoby: $l = 0,5 \text{ m}$
- zredukowana siła ciężkości:

$$Q = 0,75 \cdot 120 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 883 \text{ N} \quad (1)$$

Stąd maksymalny moment rozwijany przez napęd stawu (przegubu) kolanowego wynosi:

$$M = (883 \text{ N} \cdot 0,5 \text{ m})/2 = 221 \text{ Nm} \quad (2)$$

Metodyka doboru napędów wskazuje na konieczność określenia nie tylko momentu maksymalnego, ale również momentu obciążającego napędy w sposób ciągły. Należy, bowiem wziąć pod uwagę, że:

- oszacowana wartość momentu maksymalnego dotyczy najbardziej obciążonego stawu; w pozostałych stawach obciążenia będą mniejsze,
- u osób o mniejszej masie, niż założona w obliczeniach, wymagane momenty będą miały mniejsze wartości,
- w praktyce, obciążenia układów wykonawczych podczas wstawania z krzesła będą mniejsze, gdyż układ sterowania urządzenia SPIWR będzie wspierał naturalną tendencję do wychylania się użytkownika w trakcie wstawania ku przodowi, co w istotny sposób zmniejszy wartości momentów obciążających stawy.

Przeprowadzone obliczenia i analiza możliwych do występowania momentów obciążających, pozwoliły na określenie wartości momentu ciągłego rozwijanego przez napęd stawu kolanowego, którego wartość nie powinna być mniejszą niż 100Nm.

Ostatecznie dla pierwszej, badawczej wersji napędu przyjęto następujące wymagania:

- przenoszony moment: $M = 300 \text{ Nm}$
- prędkość obrotowa: $45^\circ/\text{s}$
- zakres kątowy: 120°

Dodatkowymi wymaganiami stawianymi przed konstrukcją są:

- możliwość wbudowania przetworników położenia kątowego,
- brak samohamowności
- minimalizacja masy oraz gabarytu napędu

Wybór koncepcji

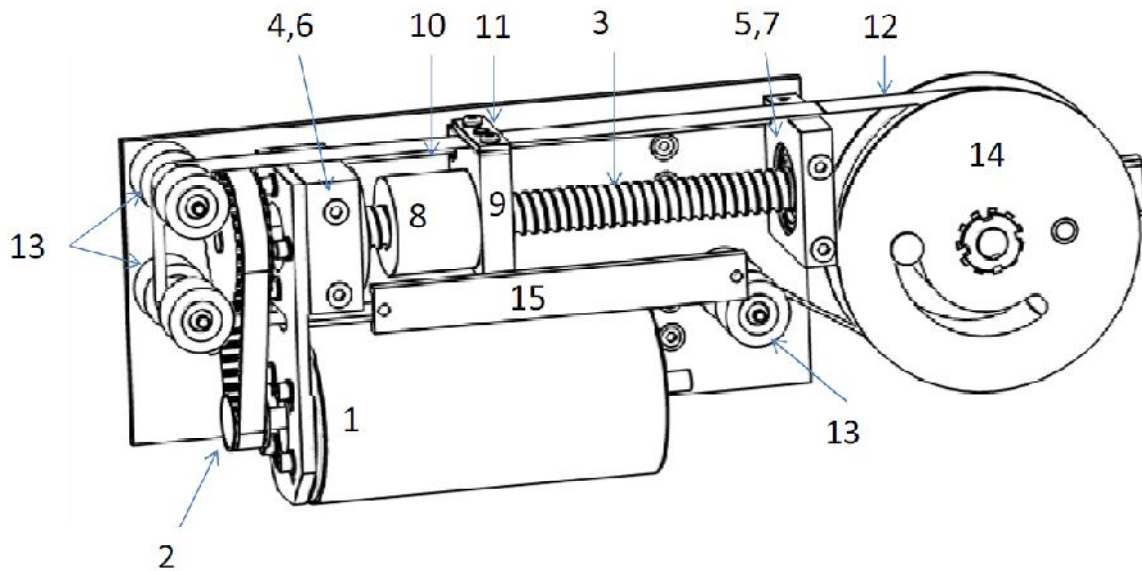
W wyniku pogłębionej dyskusji przyjęto, że układ wspomaganie chodu osób niepełnosprawnych będzie napędzany napędami elektrycznymi. Zdecydowały o tym głównie czynniki związane z bezpieczeństwem użytkownika takich napędów, ich wysoką niezawodnością, prostotą serwisu oraz wspólnym źródłem zasilania układów napędowych, pomiarowych i sterujących.

Porównując obliczone momenty oraz zakresy kątowe występujące w stawach biodrowym oraz kolanowym zdecydowano się na zaprojektowanie jednej konstrukcji układu napędowego dla obu tych stawów. Jediną różnicą jest rozłożenie zakresu kątowego, tzn. dla stawu kolanowego realizowany jest zakres kątowy od 0° do 120° , natomiast dla stawu biodrowego zakres ten wynosi od -15° do 105° .

3. OPIS REALIZOWANEJ KONSTRUKCJI

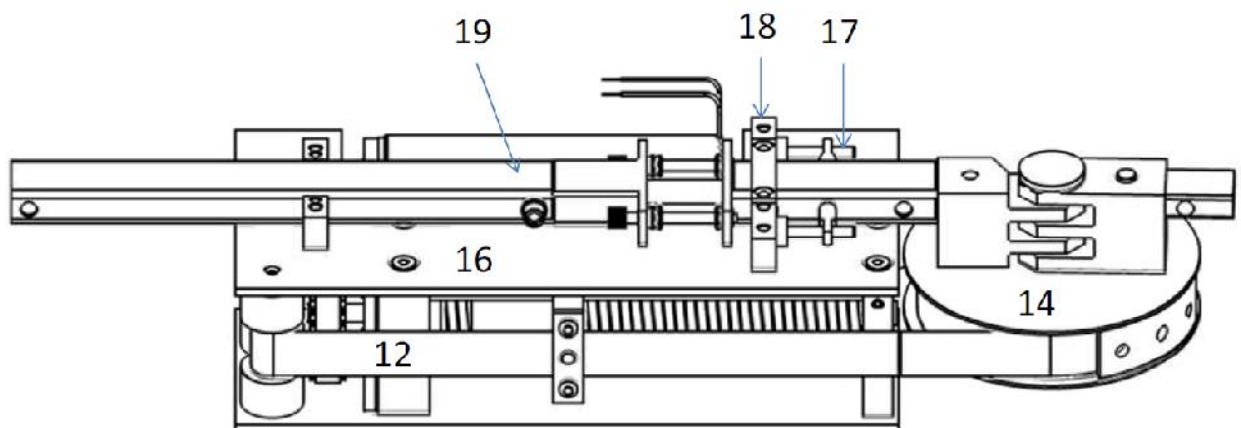
W celu sprostania postawionym wymaganiom należało zaprojektować napęd cechujący się dość dużym przełożeniem całkowitym, przy zachowaniu wysokiej sprawności. Zdecydowano się na zastosowanie trzech stopni redukcyjnych różnych typów.

Pierwszym stopniem, zaczynając od silnika prądu stałego, była przekładnia pasowa z paskiem zębatym. Następnie wykorzystano śrubę toczną która zamieniała ruch obrotowy na ruch liniowy. Do nakrętki, której ruch obrotowy został odebrany, utwierdzono cięgno napędzające krążek przenoszący napęd na staw robota ortotycznego. Cięgno na krążku również zostało utwierdzone. Zastosowany układ cechuje się przełożeniem wynoszącym 160 przy sprawności w granicach 85%.



Rys. 4. Budowa modułu napędowego ze śrubą toczną, widok z usuniętą płytą obudowy mechanizmu, opis w tekście

Silnik napędowy 1 poprzez przekładnię pasową z paskiem zębatym 2 napędza śrubę toczną 3. Śruba jest ułożyskowana w łożyskach 4 i 5 zamkniętych w oprawach (odpowiednio 6 i 7). Nakrętka toczna 8 wraz z płytą 9 przemieszcza się wzdłuż prowadnicy 10 odbierającej możliwość obrotu temu układowi. W płycie 9 osadzone jest mocowanie cięgna 11 utwierdzające cięgno 12. Cięgno jest zapętłone wokół układu rolek 13 i koła przegubu 14 w którym też jest utwierdzone. Ruch cięgna 12 mierzony jest przez połączony z nim przetwornik 15.



Rys. 5. Budowa modułu napędowego ze śrubą toczną, opis w tekście

Przemieszczenie nakrętki tocznej 8 powoduje ruch cięgna 12 i obrót koła przegubu 14 względem obudowy modułu 16 (rys.5), połączonej uchwytem 18 z łącznikiem 19z układem regulacji. Kasowanie luzu jest możliwe poprzez układ 17.

4. PODSUMOWANIE

W czasie prac projektowych głównym problemem był odpowiedni dobór układu przeniesienia napędu, który sprostałby stawianym wymaganiom. Analizę możliwych rozwiązań rozpoczęto od sprawdzenia dostępnych w sprzedaży mechanizmów przeniesienia napędu oraz samych napędów, jednak żaden nie spełniał wszystkich założeń, przy jednoczesnym ograniczeniu wymiarów gabarytowych. Podjęto zatem decyzję o zaprojektowaniu napędu umożliwiającego niezależny dobór wszystkich elementów składowych, czyli silnika oraz układów przeniesienia napędu. Zaprojektowany układ spełnił wszystkie założenia projektowe, jednak jego konstrukcja skupiająca główne przełożenie w środkowym stopniu, tzn. w śrubie tocznej, stawiała duże wymagania wytrzymałościowe przed zastosowanym cięgnem utwierdzonym. Cięgno to musiało przenosić znaczne siły, rzędu 6000N. Początkowo planowano wykorzystanie w roli cięgna taśmy stalowej sprężynowej, której wytrzymałość na rozciąganie była wystarczająca, jednak zrezygnowano z tego rozwiązania z uwagi na narzucone przez producenta minimalne promienie gięcia taśmy, znacząco odstających od planowanego przebiegu cięgna. Po sprawdzeniu kilku rodzajów taśm oraz linek zdecydowano się na zastosowanie linek spadochronowych, które przy odpowiednim zwielokrotnieniu spełniają wymagania wytrzymałościowe, jednocześnie nie wprowadzając ograniczeń co do trasy cięgna w układzie napędowym. Obecnie prowadzone są badania przedstawionej konstrukcji obejmujące testy wytrzymałości poszczególnych elementów konstrukcji oraz charakterystyk ruchowych napędu.

**Przedstawione prace zostały wykonane w ramach projektu ECO-Mobilność
Nr UDA-POIG.01.03.01-14-154/09-00 finansowanego ze środków Unii Europejskiej.**

LITERATURA

- [1] Druzbicki M., Szymczyk D., Snela S., Dudek J., Chuchla M.: *Obiektywne, ilościowe metody analizy chodu w praktyce klinicznej*, Przegląd Medyczny Uniwersytetu Rzeszowskiego, 4, Rzeszów 2009, s. 356–362
- [2] Bagiński K., Wierciak J., Jasińska-Choromańska D.: *Symulacyjny model układów wykonawczych robota ortotycznego*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2011, v. 57, nr 6, s. 583-586
- [3] Wierciak J., Jasińska-Choromańska D., Szykiedans K., Bartyś M.: *Koncepcja systemu sterowania urządzenia do wspomaganie chodu*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2011, nr 09, s. 1016-1019
- [4] Jasińska-Choromańska D., Radziemski B., Szykiedans K., Getko K., Wierciak J.: *Wykorzystanie systemu pionizacji i wspomaganie ruchu w pojeździe PRT*, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej seria: Transport*, 2010, z. 73, s. 35-44
- [5] Gawrysiak M.: *Mechatronika i projektowanie mechatroniczne*, Politechnika Białostocka, *Rozprawy Naukowe nr 44*, Białystok 1997.
- [6] Kiel E. (ed.): *Drive solutions. Mechatronics for Production and Logistics*, Springer, Berlin 2008.

- [7] Morecki A., Knapczyk J., Kędzior K.: *Teoria mechnizmów i manipulatorów. Podstawy i przykłady zastosowań w praktyce*, Warszawa, WNT, 2002.
- [8] Pons J. L.: *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*, John Wiley & Sons, Chichester 2008.
- [9] Zielińska T.: *Maszyny kroczące. Podstawy, projektowanie, sterowanie i wzorce biologiczne*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2003.

VARIOUS ASPECTS OF DESIGN OF THE DRIVE SYSTEMS FOR ORTHOTIC ROBOTS