

Modelowanie chodu robota ortotycznego przy różnych długościach kroku

Streszczenie. W artykule opisano problem doboru długości kroku i prędkości chodu robota ortotycznego ze względu na energetyczne zapotrzebowanie układów napędowych robota, który jest zasilany z przenośnego źródła energii elektrycznej. Przeprowadzono badania symulacyjne energii pobieranej przez układy napędowe biodra i kolana podczas jednego cyklu chodu oraz przy założeniu, że robot pokonuje stały dystans 100 m. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do optymalizacji algorytmów sterowania robota.

Abstract. In the paper the effect of length of a step as well as gait velocity on energy demand of orthotic robot is discussed. The authors focused on studying the issue due to the fact that a portable energy supply was used. Simulation test of energy consumption of hip and knee actuators during one gait cycle and for an assumption that robot passes 100 meters were carried out. The results form the basis for the optimization of robot control algorithms. (**Modelling of gait of an orthotic robot at different lengths of a step**).

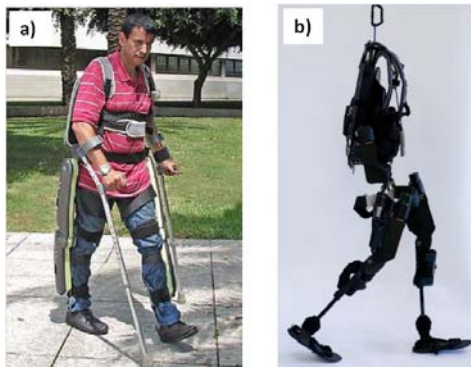
Słowa kluczowe: roboty ortotyczne, modelowanie, układy wykonawcze, chód.

Keywords: orthotic robots, modelling, actuators, gait.

doi:10.12915/pe.2014.05.18

Wprowadzenie

Współczesne urządzenia służące do wspomaganie czynności życiowych osób niepełnosprawnych często mają postać złożonych systemów mechatronicznych. Do najbardziej zaawansowanych technicznie urządzeń biomechanicznych należą roboty ortotyczne [1] – systemy przeznaczone do zastępowania utraconych funkcji ruchowych pacjentów (rys. 1). Są to wielocłonowe mechanizmy mocowane do tułowia osoby niepełnosprawnej, poruszające programowo kończyny użytkownika za pomocą elektrycznych, a czasem pneumatycznych lub hydraulicznych układów napędowych.



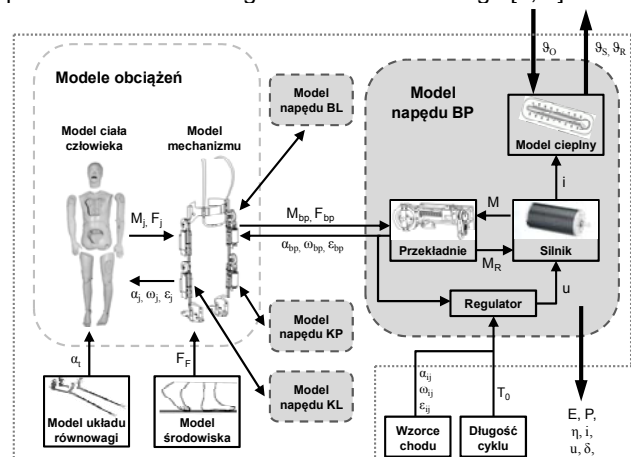
Rys. 1. Przykłady robotów ortotycznych: a) ReWalk [2], b) e-Legs [3]

Projektowanie robota ortotycznego jest złożonym procesem, wymagającym zastosowania wielu narzędzi wspomagających. Należy tu wymienić komputerowe programy do projektowania przestrzennego, pakiety do analizy naprężeń i odkształceń oraz oprogramowanie do modelowania i symulacji układów wielocłonowych. W artykule przedstawiono zastosowanie symulacyjnego modelu wykonawczych układów robota zbudowanego w ramach projektu *ECO-Mobilność* [4] do badania wpływu parametrów chodu na eksploatacyjne charakterystyki urządzenia.

Model symulacyjny robota

Model symulacyjny robota ortotycznego został opracowany w programie Simulink/SimMechanics w środowisku Matlab. Jego podstawowa struktura obejmuje model obciążeń, które muszą być przeniesione podczas

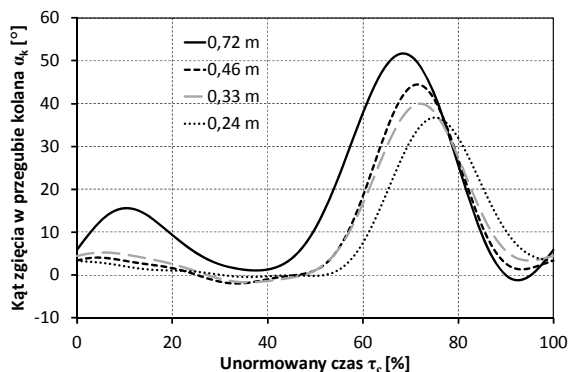
chodu przez układy wykonawcze, model kontaktu ze środowiskiem, utrzymania pozycji pionowej podczas chodu oraz modele układów wykonawczych (rys. 2). Model obciążeń obejmuje model konstrukcji robota i ciała użytkownika, które z uwagi na swoje masy i konieczność ich przyspieszenia podczas chodu są źródłem obciążeń statycznych i dynamicznych względem układów wykonawczych. Symulacyjny model robota opracowano na podstawie zbudowanego modelu technicznego [4, 5].



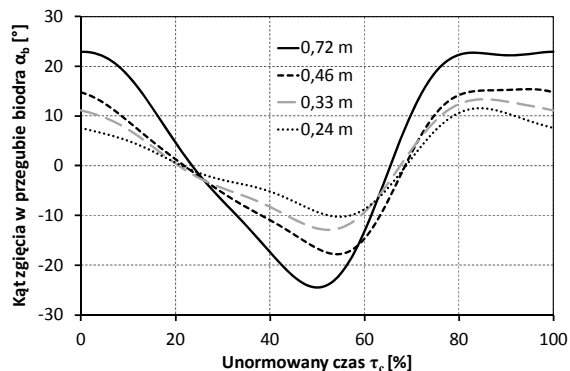
Rys. 2. Schemat modelu symulacyjnego

Modele układów wykonawczych zapisano w programie Simulink. Umożliwiają one zadawanie momentów i sił w napędzanych przegubach urządzenia, tak aby zrealizować zadany profil kątowy w stawach użytkownika. Model matematyczny układu napędowego składa się z modelu silnika prądu stałego, regulatora PID oraz modeli przekładni cięgnowej, śrubowo – tocznej i przekładni z paskiem zębatym. W modelu pominięto występowanie podatnych elementów mechanicznych. W literaturze np. [6] spotyka się opisy uwzględniające obecność podatności mechanicznych w układach przeniesienia napędu. Modele te w znaczący sposób obniżają efektywność obliczeń podczas symulacji. Sprawdzone, że zaniedbanie zjawisk sprężystych nie ma istotnego wpływu na uzyskiwane wyniki badań. Sygnałem odniesienia dla regulatorów są wyznaczone doświadczalnie kątowe przebiegi zgięcia poszczególnych stawów w cyklu chodu, które na potrzeby modelowania zastępuje się ich rozwinięciami w szereg Fouriera. Znane są także inne

podejścia do realizacji chodu robotów, w których profile ruchu są generowane w czasie rzeczywistym przez naśladowanie ruchów operatora [7]. W początkowych pracach wykorzystywano profile ruchu w stawach odpowiadające tzw. standardowi chodu [8]. W przewidywanych zastosowaniach robota ortotycznego konieczne jest odejście od tego standardu zarówno z przyczyn medycznych jak i ze względów bezpieczeństwa. Aby zbadać wpływ parametrów chodu na charakterystyki robota konieczne było więc opracowanie profili ruchu dla kroków krótszych niż standardowe. Wykonano dodatkowe pomiary chodu osób zdrowych i przekształcono je do postaci matematycznej. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Zależność profili kątowych od długości kroku dla stawu kolanowego

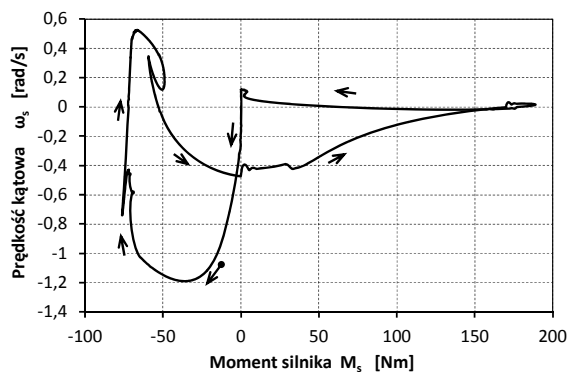


Rys. 4. Zależność profili kątowych od długości kroku dla stawu biodrowego

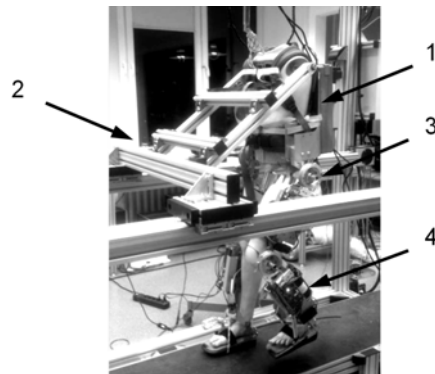
W odpowiedzi na wymuszenia w postaci zadanych profili ruchu model układów wykonawczych generuje czasowe przebiegi wielkości mechanicznych i elektrycznych, które są podstawą do oceny działania układów wykonawczych, a w szczególności ich napędów. Na rysunku 5 zamieszczono przykładową trajektorię mechaniczną silnika napędzającego przegub stawu biodrowego podczas chodu.

Wiarygodność wyników badań modelowych zależy od wierności odtwarzania modelowanych zjawisk. Do walidacji opracowanego modelu wykorzystywane jest specjalne stanowisko badawcze (rys. 6), w którym robot ortotyczny porusza nogami manekina, zastępującego użytkownika.

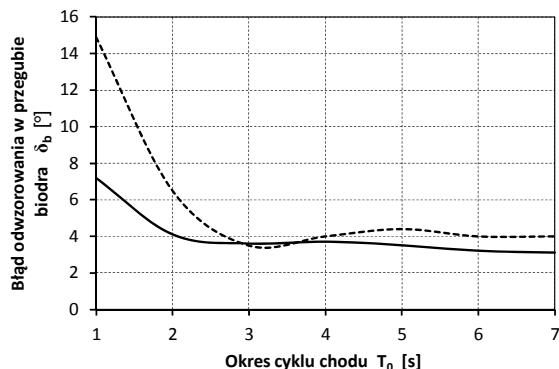
Prowadzone badania modelowe koncentrują się wokół dwu kategorii charakterystyk robota: funkcjonalnych i eksploatacyjnych. W pierwszej grupie przedmiotem zainteresowania konstruktorów są błędy odwzorowania przez system zadanych profili ruchu z myślą o utrzymaniu ich na odpowiednio niskim poziomie. Sprawdzone, że błędy te zależą od prędkości chodu, ale można na nie wpływać także przez odpowiedni dobór urządzenia napędowego i zespołu przeniesienia napędu (rys. 7).



Rys. 5. Trajektorja mechaniczna napędu przegubu biodra podczas chodu o okresie cyklu $T_0=3$ s i kroku o długości $l=0,46$ m



Rys. 6. Model techniczny robota ortotycznego zamocowany w stanowisku badawczym: 1 – manekin, 2 – stanowisko, 3 – układ napędu biodra, 4 – układ napędu kolana

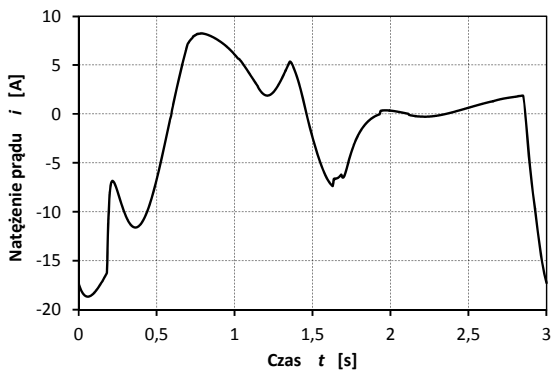


Rys. 7. Błąd odwzorowania przebiegów wzorcowych w przegubie biodra dla przypadku napędu z silnikiem Dunkermotoren GR 63Sx55 i przekładnią śrubowo-toczną (linia ciągła) oraz z silnikiem Maxon RE 35 i przekładnią falową (linia przerywana)

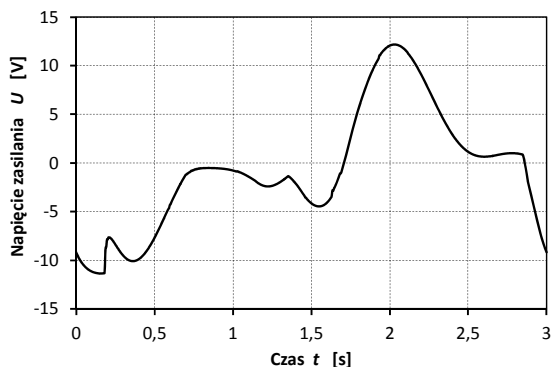
Spośród charakterystyk eksploatacyjnych duże znaczenie ma pobór energii przez układy wykonawcze podczas realizacji podstawowych funkcji robota. Pobór ten bezpośrednio wpływa na czas pracy przenośnego źródła energii elektrycznej, dlatego wiele badań ukierunkowano na możliwość zminimalizowania energetycznego zapotrzebowania robota. W kolejnym punkcie przedstawiono eksperymenty sprawdzające wpływ parametrów chodu na zużycie energii przez układy wykonawcze robota.

Eksperymenty symulacyjne

Wykorzystując opracowany model symulacyjny obliczono czasowe przebiegi podstawowych wielkości elektrycznych w napędach urządzenia podczas chodu użytkownika o masie $m_u=80$ kg i wzroście $h_u=1,7$ m: prądu i_j pobieranego przez silnik napędowy j-tego przegubu oraz napięcia jego zasilania u_j . Przykładowe przebiegi tych wielkości w układzie napędowym przegubu biodra przedstawiono na rysunkach 8 i 9.



Rys. 8. Przebieg natężenia prądu w silniku napędowym przegubu biodra podczas chodu z krokiem o długości $l=0,46$ m i okresem $T_0=3$ s

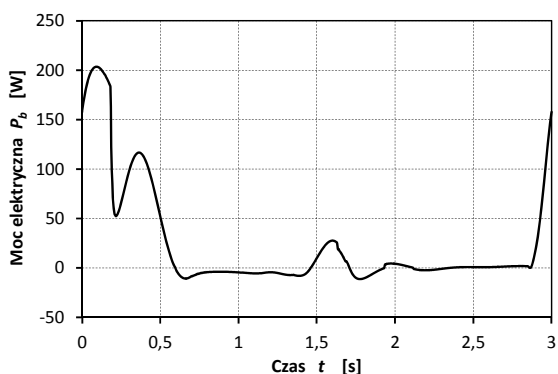


Rys. 9. Przebieg napięcia zasilania silnika napędowego przegubu biodra podczas chodu z krokiem o długości $l=0,46$ m i okresem $T_0=3$ s

Chwilowa moc elektryczna pobierana przez napęd jest obliczana zgodnie ze wzorem:

$$(1) \quad P_j = i_j(t) \cdot u_j(t).$$

Przykładowy przebieg mocy pobieranej ze źródła przez napęd biodra przedstawiono na rysunku 10. Chwilowe zapotrzebowanie na moc w napędzie przegubu stawu kolanowego charakteryzuje się większą zmiennością, ale osiąga kilkukrotnie mniejsze wartości (rys. 11).



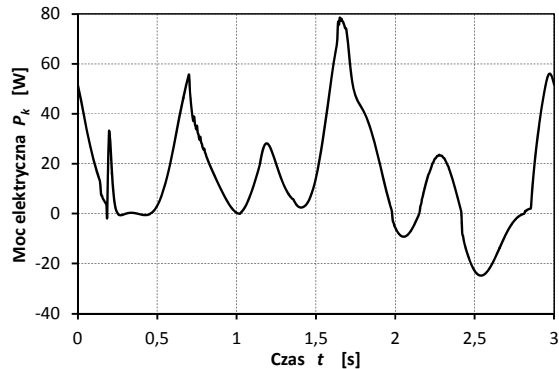
Rys. 10. Przebieg mocy elektrycznej pobieranej przez silnik napędowy przegubu biodra podczas chodu z krokiem o długości $l=0,46$ m i okresem $T_0=3$ s

W obu przedstawionych przebiegach daje się zauważyć niewielkie fragmenty, w których moc elektryczna przyjmuje wartości ujemne. Są to okresy prądnicowej pracy napędów. W tych fazach można zaplanować odzyskiwanie energii. W zbudowanym modelu technicznym robota nie uwzględniono jeszcze takiej funkcji. W modelu symulacyjnym silnik jest sterowany za pomocą regulatora PID, który wypracowuje stosownie do fazy ruchu napięcie o określonym zwrocie i

wartości. Ze względu na dominującą rolę silnikowej pracy napędów w prowadzonych badaniach uwzględniono pobór energii przez układy wykonawcze w okresach tej właśnie pracy. Energię elektryczną E_j pobraną ze źródła przez układ napędowy j -tego przegubu podczas jednego cyklu chodu obliczano więc ze wzoru:

$$(2) \quad E_j = \int_t^{t+T_0} i_j(t) \cdot u_j(t) dt \quad \text{dla} \quad \text{sgn}(i_j) \cdot \text{sgn}(u_j) = 1,$$

w którym: t – bieżący czas symulacji [s], T_0 – długość cyklu chodu [s].

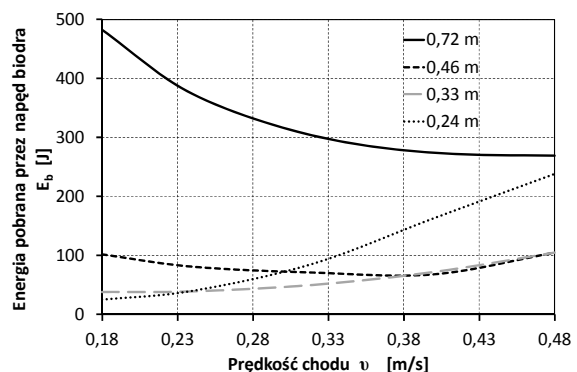


Rys. 11. Przebieg mocy elektrycznej pobieranej przez silnik napędowy przegubu kolana podczas chodu z krokiem o długości $l=0,46$ m i okresem $T_0=3$ s

Badania symulacyjne

W badaniach symulacyjnych wykorzystano parametry silnika GR 63Sx55 [9] niemieckiej firmy Dunkermotoren, który zastosowano w technicznym modelu urządzenia. Wykonano eksperymenty polegające na zrealizowaniu przez zamodelowane układy wymaganego profilu kąтового w przegubach kolana i biodra (rys. 3 i 4). Badania przeprowadzono dla czterech różnych długości kroków z przedziału 0,23 – 0,72 m. Zarejestrowano czasowe odpowiedzi: prądu, napięcia i energii pobranej ze źródła przez silniki napędzanych przegubów przy pięciu różnych prędkościach chodu z zakresu 0,18 – 0,48 m/s. Ponadto zbadano zużycie energii przy tych samych parametrach chodu na dystansie 100 m.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania energii pobranej przez układ napędowy biodra i kolana podczas jednego cyklu chodu. Otrzymane wyniki badań symulacyjnych dla przegubu biodra przedstawiono na rysunku 12.

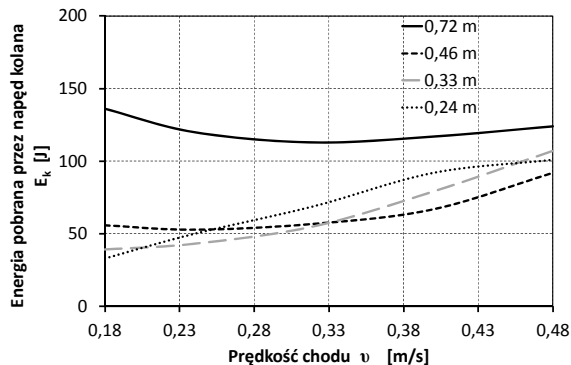


Rys. 12. Zależność energii pobranej ze źródła podczas jednego cyklu od długości kroku i prędkości chodu przez silnik napędowy przegubu biodra

Uzyskane wyniki pokazują, że każdej z badanych prędkości chodu można przyporządkować długość kroku, przy której energia pobrana przez napęd biodra podczas

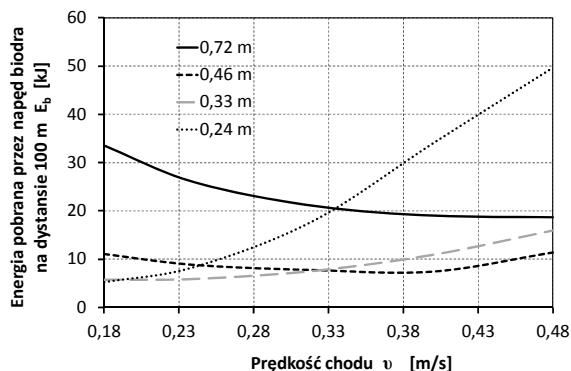
jednego cyklu jest najmniejsza. Dla małych prędkości korzystny jest chód z bardzo drobnymi krokami.

Na rysunku 13 zebrano wyniki badań symulacyjnych otrzymanych podczas jednego cyklu chodu dla przegubu kolana. Podobnie jak w przypadku napędu biodra zmniejszenie poboru energii osiąga się zmniejszając długość kroku dla małych prędkości chodu i zwiększając dla prędkości dużych.



Rys. 13. Zależność energii pobranej ze źródła podczas jednego cyklu od długości kroku i prędkości chodu dla przypadku silnika napędowego przegubu kolana

Kolejna seria badań symulacyjnych dotyczyła określenia zapotrzebowania na energię elektryczną przy założeniu, że robot pokonuje stały dystans 100 m. Badania przeprowadzono tak jak poprzednio dla różnych prędkości chodu i czterech analizowanych długości kroku. Otrzymane wyniki zużycia energii przez napęd przegubu biodra przedstawiono na rysunku 14. Wskazują one na dużą zależność ilości pobranej ze źródła energii od prędkości chodu i długości wykonywanych kroków.



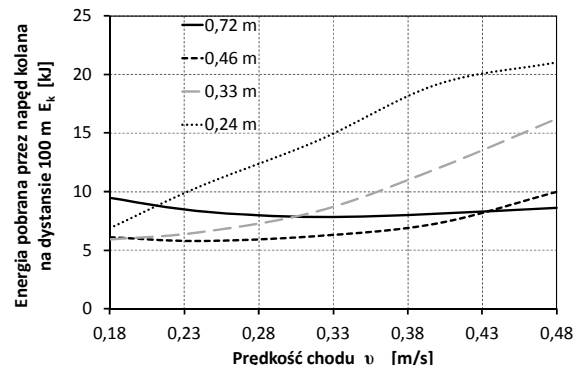
Rys. 14. Zależność energii pobranej ze źródła na dystansie 100 m od długości kroku i prędkości chodu przez silnik napędowy przegubu biodra

Na rysunku 15 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych energii pobranej przez układ napędowy kolana. Podobnie jak w przypadku napędu biodra najmniejsze zużycie energii występowało w przypadku realizacji chodu drobnymi krokami z jak najmniejszymi prędkościami.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione badania stanowią fragment prac nad doborem algorytmów sterowania układów wykonawczych robota. Algorytmy te powinny bezpiecznie realizować ruchy pacjenta zgodnie z wymaganiami terapeutycznymi oraz minimalizować energetyczne zapotrzebowanie układów wykonawczych, zapewniając tym samym możliwie dużą autonomię użytkownika przy ograniczonej pojemności przenośnego źródła energii. Wyniki symulacji stanowią istotny wkład do tych prac, pokazując bowiem możliwości

optymalizacji parametrów chodu ze względu na pobór energii przez robota. Jest to wskazanie, które należy wykorzystać na etapie przygotowywania produkcyjnego prototypu urządzenia. Trzeba przy tym mieć na uwadze, że użyty do badań model symulacyjny, choć bardzo złożony, ma także wiele uproszczeń. Z tego względu ostateczne decyzje dotyczące kształtu algorytmów sterujących warto sprawdzić na drodze doświadczałnej.



Rys. 15. Zależność energii pobranej ze źródła na dystansie 100 m od długości kroku i prędkości chodu przez silnik napędowy przegubu kolana

Podziękowanie

W artykule wykorzystano m.in. wyniki prac wykonanych w ramach projektu "ECO Mobilność" nr UDA-POIG.01.03.01-14-154/09-00 finansowanego ze środków Unii Europejskiej.

LITERATURA

- [1] Pons J. L., Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons. Wyd. John Wiley & Sons, Chichester 2008
- [2] Strausser, K. A. and Kazerooni, H., The Development and Testing of a Human Machine Interface for a Mobile Medical Exoskeleton, *IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, (2011), 4911-4916
- [3] Bogue R., Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments, *Industrial Robot: An International Journal*, 36 (2009), nr. 5, 421-427
- [4] Jasińska-Choromańska D., Szykiedans K., Wierciak J., Kołodziej D., Zaczyk M., Bagiński K., Bojarski M., Kabziński B., Mechatronics system for verticalization and the motion of the disabled, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol. 61, No. 2, 2013, 419-431
- [5] Jasińska-Choromańska, D., Credo, W., Szykiedans, K., Making use of anthropometric data while designing drive units of an orthotic robot, *Machine Dynamics Research*, 36(2012), nr 1, 90-98
- [6] Czaban A., Lis M., Model matematyczny napędu prądu stałego na podstawie podejść wariacyjnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2012), nr 12b, 20-22
- [7] Cui Y., Byun H. J., Shon S. G., Badania charakterystyki sterowania metodą naśladowczą dla dwunożnego, chodzącego robota, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2013), nr 5, 26-29
- [8] Perry J., Gait, Analysis, Normal and Pathological Function, Slack Incorporated 1992
- [9] Dunkermotoren. Permanent Magnet DC-Motors. Katalog silników prądu stałego

Autorzy: mgr inż. Karol Bagiński, Politechnika Warszawska, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, E-mail: k.baginski@mchtr.pw.edu.pl;
inż. Alicja Cegielska, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, E-mail: cegielska.alicia@gmail.com;
dr inż. Jakub Wierciak, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, E-mail: j.wierciak@mchtr.pw.edu.pl.