

Jakub Wierciak, Danuta Jasińska-Choromańska
Politechnika Warszawska

Ksawery Szykiedans, Karol Bagiński
Politechnika Warszawska

URZĄDZENIE DO WSPOMAGANIA CHODU OSÓB NIEPEŁNOSPRAWNYCH, JAKO SYSTEM MECHATRONICZNY

Streszczenie: Współcześnie mechatronika jest dominującą koncepcją budowy różnego rodzaju systemów technicznych. Duże szybkości przetwarzania danych w jednostkach sterujących urządzeń mechatronicznych i wysoka dynamika ich układów wykonawczych umożliwiają poszerzanie obszarów ich zastosowań. Takie zjawisko ma miejsce także w medycynie, w szczególności przy próbach zastępowania utraconych funkcji ruchowych człowieka za pomocą robotów wspomagających. Autorzy pracują nad urządzeniem do wspomaganie chodu osób z bezwładem nóg. W artykule przedstawiono strukturalną koncepcję opracowywanego systemu.

Słowa kluczowe: chód człowieka, urządzenia mechatroniczne, egzoszkielety

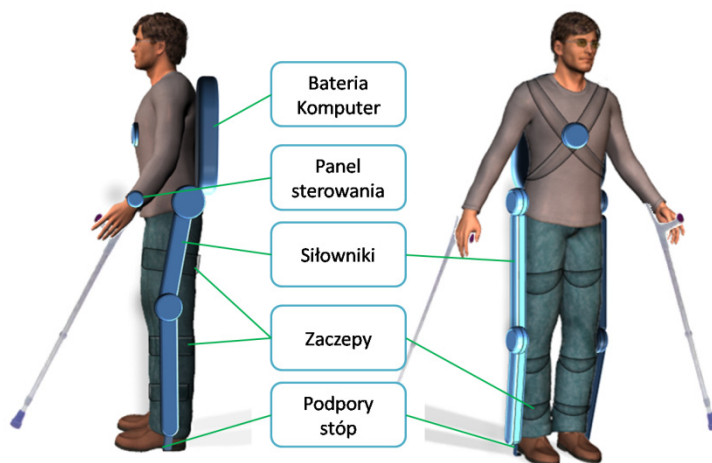
1. WPROWADZENIE

W Zakładzie Konstrukcji Urządzeń Precyzyjnych Politechniki Warszawskiej rozpoczęto prace nad urządzeniem do pionizacji i wspomaganie chodu osób z bezwładem nóg. Projektowane urządzenie o roboczej nazwie *VENI* (łac. przybyłem) można zaliczyć do kategorii tzw. „wearable robots” [6], co w dosłownym tłumaczeniu z języka angielskiego oznacza roboty stanowiące rodzaj ubrania dla użytkownika. Ich zadaniem jest zastępowanie lub wspomaganie kończyn człowieka. W zależności od realizowanej funkcji roboty te klasyfikowane są do jednej z trzech grup [6]:

- a) egzoszkielety - wzmacniające siłę ludzkich mięśni ponad ich naturalne możliwości,
- b) roboty ortotyczne – odtwarzające utracone lub osłabione funkcje ludzkich kończyn,
- c) roboty protetyczne – zastępujące kończynę po jej amputacji.

2. STRUKTURA URZĄDZENIA

Budowane urządzenie (rys. 1) zalicza się do grupy robotów ortotycznych. Jego główną funkcją jest wymuszenie ruchu dolnych kończyn użytkownika w sposób zbliżony do normalnego chodu człowieka. Dodatkowo system ma zapewnić użytkownikowi możliwość pokonywania wybranych przeszkód, w tym wchodzenia po znormalizowanych schodach i schodzenia z nich, a także siadania na standardowych meblach i wstawania z nich. Przyjęto założenie, że urządzenie będzie realizować ruchy nóg użytkownika zgodnie z określonymi programami. Pozostałe elementy chodu tj. odciążanie przestawianej nogi i zachowanie dynamicznej równowagi w pierwszym podejściu pozostawia się użytkownikowi wyposażonemu w dodatkowe przyrządy ortopedyczne np. kule.



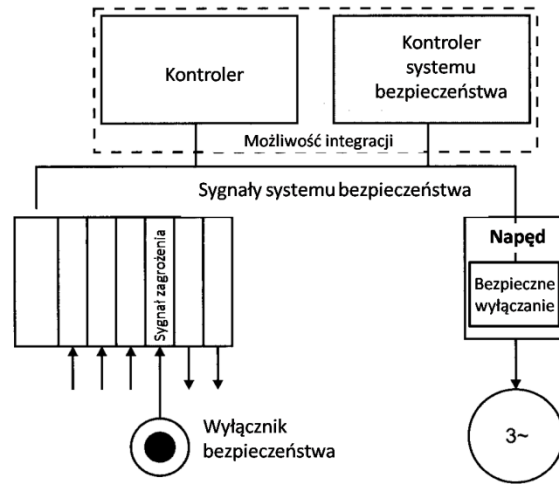
Rys. 1. Projektowany system *VENI*

Chociaż podstawowym przeznaczeniem urządzenia jest przywrócenie utraconych funkcji motorycznych osób niepełnosprawnych i zredukowanie negatywnych skutków medycznych wynikających z bezruchu kończyn, ważną funkcją systemu będzie zminimalizowanie ryzyka wystąpienia dodatkowych urazów użytkownika. System powinien eliminować wszelkie możliwe zagrożenia i nie dopuszczać do realizacji ruchów, jeśli zagraża to zdrowiu pacjenta.

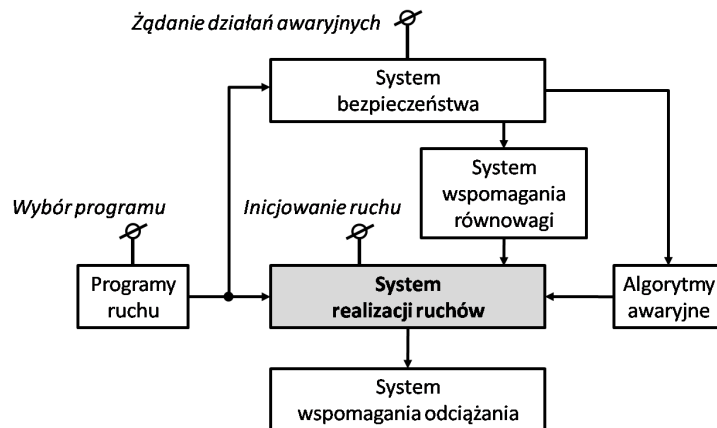
We współczesnych maszynach, które mają charakter mechatroniczny, systemy bezpieczeństwa są silnie zintegrowane z systemami realizacji funkcji głównej (rys. 2). W literaturze [5] podkreśla się, że dobrze jest, gdy oba systemy w jak największym stopniu korzystają z tych samych układów wykonawczych i pomiarowych.

Oprócz systemu zapewnienia bezpieczeństwa projektowane urządzenie może zawierać dodatkowe poziomy funkcjonalne wspomagające m.in. utrzymanie równowagi, a także, jeśli zostanie to uznane za słuszne, wspomagające odciążania przemieszczanej nogi. W przypadku tych systemów konieczne będzie precyzyjne określenie realizowanych funkcji, a podczas projektowania ustalenie wspólnych części poszczególnych poziomów. Analiza planowanych funkcji urządzenia prowadzi do jego struktury funkcjonalnej przedstawionej na rys. 3. Pokazane na schemacie moduły oprogramowania związane z realizacją ruchów i

działaniami awaryjnymi w rzeczywistości będą stanowiły integralne części systemów: odpowiednio realizacji ruchów i bezpieczeństwa.



Rys. 2. Współczesna koncepcja automatyzacji zintegrowanej z systemem bezpieczeństwa wg [5]

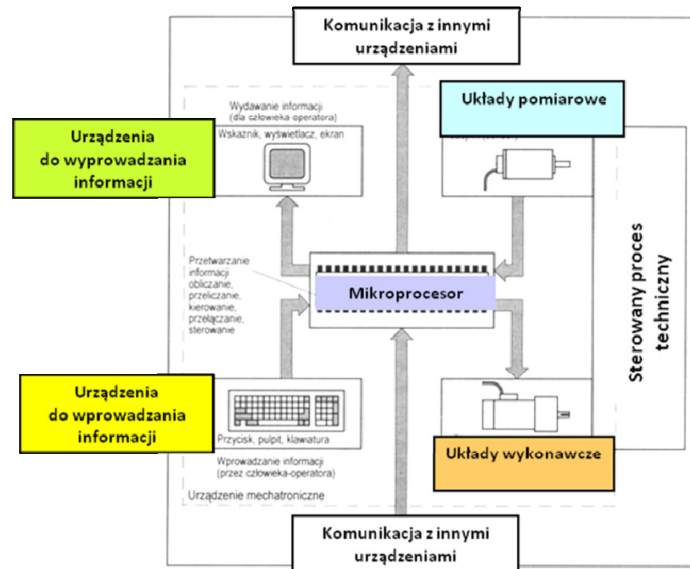


Rys. 3. Proponowana struktura funkcjonalna urządzenia VENI

Jako roboty, urządzenia wspomagające ruchy człowieka są typowymi przykładami systemów mechatronicznych, których struktura jest przedstawiana w postaci ogólnego schematu jak na rys. 4. Liczne konstrukcyjne podobieństwa między trzema wymienionymi wcześniej odmianami robotów umożliwiają wzajemne korzystanie z doświadczeń zdobytych przez twórców z różnych ośrodków, pracujących nad różnymi rozwiązaniami. W kolejnym punkcie dokonano przeglądu rozwiązań wybranych robotów wspomagających chód człowieka odnosząc się do poszczególnych elementów struktury z rys. 4. Przegląd poświęcono systemowi realizacji ruchów uznając, że to on będzie najbardziej rozbudowanym systemem urządzenia i najsilniej będzie integrował pozostałe zespoły funkcjonalne.

3. ANALIZA BUDOWY SYSTEMU W ODNIESIENIU DO FUNKCJI GŁÓWNEJ

Identyfikację poszczególnych elementów systemu przeprowadzono w odniesieniu do funkcji wymuszania ruchu.



Rys. 4. Ogólny schemat urządzenia mechatronicznego [1]

3.1. Sterowany proces

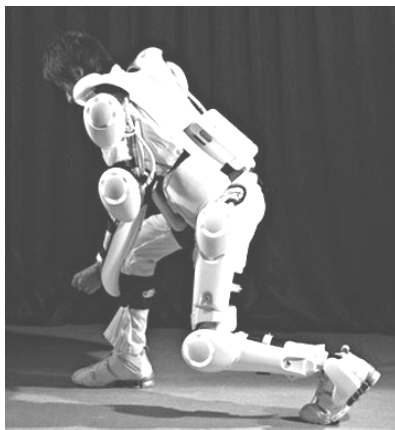
W myśl przyjętych założeń w przypadku urządzenia *VENI* sterowanym procesem jest wprowadzanie bezwładnych kończyn dolnych użytkownika w ruch przypominający normalny chód człowieka lub wymuszanie ruchów odpowiadających pokonywaniu przeszkód, wstawaniu, czy też siadaniu.

3.2. Układy wykonawcze

Układy wykonawcze urządzenia będą służyły do poruszania dolnych kończyn użytkownika. Liczba tych układów zostanie ustalona w dalszych pracach. Według powszechnie przyjętych uproszczeń [6] każda z nóg charakteryzuje się 7. stopniami swobody: staw biodrowy i staw skokowy po 3 stopnie oraz staw kolanowy – 1 stopień. W systemach wspomagania chodu liczbę tę z reguły ogranicza się do 3. na każdą z kończyn. Napędzane elementy mechaniczne tych robotów łączone są z kończynami użytkowników za pomocą paszków pozostawiających możliwość niewielkich względnych przemieszczeń nóg względem sztywnej konstrukcji robota.

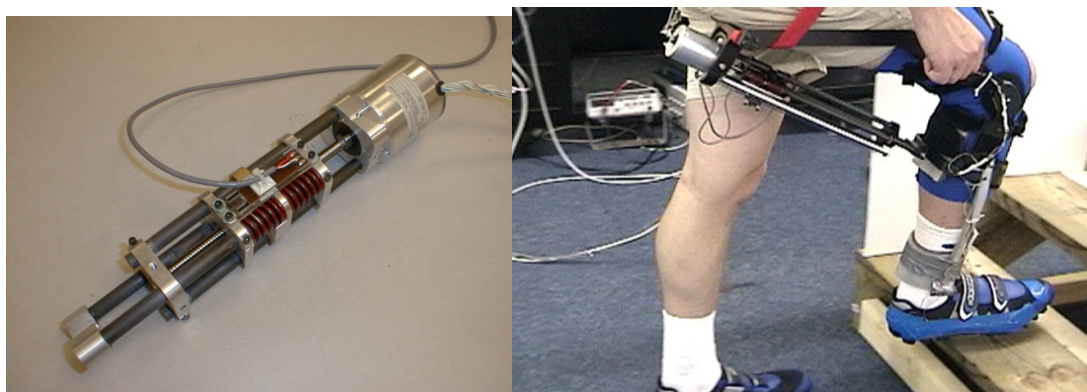
W japońskim egzoszkielecie *HAL-5* (*Hybrid Assistive Leg – hybrydowa noga wspomagająca*) [4, 8], przeznaczonym zarówno do zwiększania możliwości siłowych człowieka, jak i do celów rehabilitacyjnych (rys. 5), nogi użytkownika napędzane są przez silniki prądu stałego za pośrednictwem przekładni falowych umiejscowionych dokładnie w osi prze-

gubu i zapewniających zginanie/prostowanie biodra i kolana. Urządzenie *HAL* w odróżnieniu od wielu innych egzozoskieletów przenosi obciążenie na powierzchnię ziemi z wykorzystaniem układu kostnego człowieka, a jego zadaniem jest jedynie zwiększanie momentów w stawach: biodrowym, kolanowym i skokowym.



Rys. 5. Egzozoskielet HAL-5 [8]

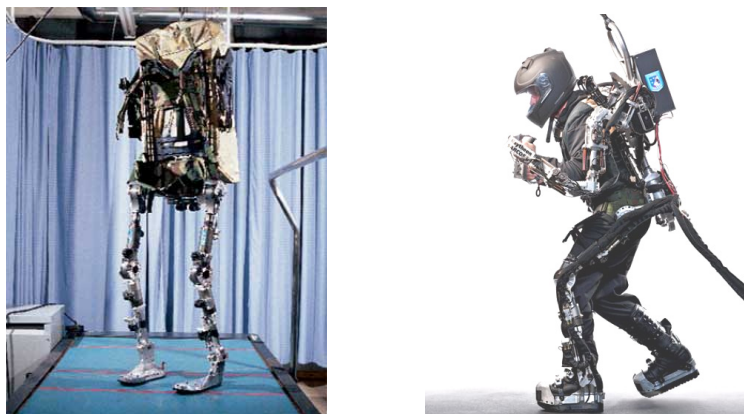
Egzozoskielet *RoboKnee* jest stosunkowo prostym urządzeniem do wspomagania stawu kolanowego przy wchodzeniu po schodach oraz przy kucaniu [7]. Urządzenie działa w sposób nadążny wykorzystując specjalny sprężysty siłownik liniowy (*Series Elastic Actuator*) (rys. 6a) zamocowany do stabilizatora kolana tuż pod biodrem i na łydce (rys. 6b). Zadaniem urządzenia jest dostarczanie dodatkowego momentu do kolana przy jak najmniejszym fizycznym wysiłku użytkownika. Układ sterowania *RoboKnee* wykorzystuje czujniki siły reakcji podłoża w kierunku pionowym i położenia środka ciężkości w płaszczyźnie strzałkowej. Te informacje są wykorzystywane w układzie dodatniego sprzężenia zwrotnego mającego za zadanie zwiększanie momentu w kolanie. Nie ma on jednak możliwości pomiaru sił bocznych, lub kąta działania siły względem podłoża. Kąt ugięcia kolana określa się na podstawie położenia siłownika, które jest mierzone za pomocą liniowego przetwornika inkrementalnego.



Rys. 6. a) Sprężysty siłownik liniowy, b) przykład zastosowania egzozoskieletu *RoboKnee* [7]

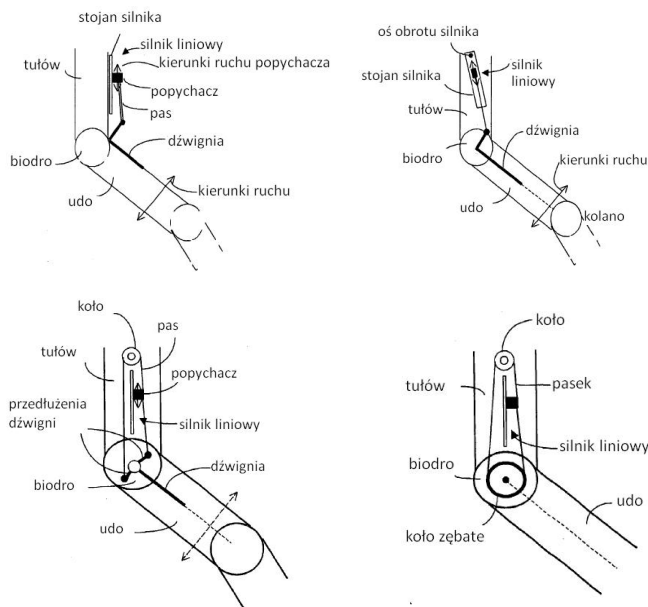
Egzozoskielet *Sarcos* [3] wspomaga układy mięśniowe całego ciała użytkownika (rys. 7). Jest on zasilany z przenośnego źródła energii. Zastosowano w nim hydrauliczne siłowniki

obrotowe umieszczone dokładnie na napędzanych przegubach urządzenia. Do sterowania *Sarcos* używa czujników siły pomiędzy użytkownikiem a robotem, które mają za zadanie odczytywać ruchy użytkownika i dostosowywać do nich ruchy egzoszkieletu (sterowanie „get out of the way”). Stopa użytkownika komunikuje się z egzoszkieletem poprzez sztywną metalową płytkę zawierającą czujniki siły, co uniemożliwia jej zginanie się.



Rys. 7. Egzoszkielet *Sarcos* i użytkownik wspomagany tym urządzeniem [3]

W chwili obecnej najbardziej zaawansowanym pod względem przygotowania do powszechnego użytkownika egzoszkieletem dolnych kończyn przeznaczonym wyłącznie dla osób niepełnosprawnych jest urządzenie *ReWalk* opracowane w firmie Argo Medical Technologies [9]. Twórcy tego urządzenia jak dotąd unikają publikowania swoich rozwiązań. Pewnych informacji dostarcza analiza licznych materiałów filmowych promujących osiągnięcia firmy. Robot wyposażony jest w napędy elektryczne. W patencie [2] przedstawiono kilka możliwych rozwiązań układów napędzających przeguby robota (rys. 8).



Rys. 8. Warianty konstrukcji układów napędowych w układzie ruchu nóg wg patentu dotyczącego robota *ReWalk* [2]

3.3. Układy pomiarowe

W przypadku egzoszkieleatów sterowanych na podstawie sygnałów z układu nerwowego człowieka układy sensoryczne są bardzo rozbudowane zarówno w warstwie sprzętowej, jak i programowej. Na przykład system sterowania robota *HAL* wykorzystuje elektrody *EMG* umieszczone na powierzchni skóry poniżej biodra i nad kolanem oraz dodatkowo czujniki siły reakcji podłoża. Żyroskop i akcelerometr zamontowane w plecaku służą do określania chwilowej pozycji tułowia użytkownika. Czujniki współpracują z dwoma systemami sterowania: opartym na sygnałach *EMG* i opartym na wzorcach chodu. Pierwszy z nich rozpoznaje zamiary użytkownika, drugi steruje układami wykonawczymi [8].

W projektowanym urządzeniu, ze względu na przyjętą koncepcję programowej realizacji ruchów kończyn, układy pomiarowe będą służyły do kontroli poprawności wykonywanych ruchów, a w szczególności kontroli ich wykonania (zakończenia). Zdecydowaną rolę będą spełniać przetworniki dostarczające sygnały do systemów: bezpieczeństwa i wspomagania równowagi.

3.4. Urządzenia do wprowadzania informacji

Będą to urządzenia w pierwszej kolejności służące do:

- wprowadzania danych potrzebnych do uruchomienia systemu,
- wybierania określonego programu pracy i jego parametrów,
- inicjowania ruchów.

Sposoby wprowadzania informacji przez użytkownika będą przedmiotem oddzielnych rozważań. W urządzeniu *ReWalk* [10] podstawowym urządzeniem wejściowym jest dla użytkownika specjalny pulpit (pilot) zamocowany do nadgarstka, zaopatrzony w przyciski do wybierania programu pracy.



Rys. 9. Pulpit urządzenia *ReWalk* [10]

3.5. Urządzenia do wyprowadzania informacji

Zadaniem urządzeń do wyprowadzania informacji będzie powiadamianie użytkownika o wszystkich istotnych faktach mających wpływ na funkcjonowanie systemu. W systemie poruszania nóg informacje takie będą dotyczyły m.in.:

- ewentualnych usterek w systemie wykrytych przez układy diagnostyczne,
- aktualnego poziomu energii pomocniczej w przenośnym źródle.

Ankieta przeprowadzona wśród osób niepełnosprawnych nie dała jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o oczekiwany sposób informowania użytkowników. Można w związku z tym planować dostosowywanie tego sposobu do potrzeb indywidualnych, czyli opracować i stosować zamiennie urządzenia wizyjne i dźwiękowe lub innego rodzaju.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone rozważania wyznaczają kierunki prac nad urządzeniem do wspomagania chodu osób z bezwładem nóg. Podstawowe prace konstrukcyjne będą się koncentrować na systemie do realizacji ruchów nóg użytkownika. W tym samym czasie zostanie opracowana koncepcja systemu bezpieczeństwa, a także koncepcje wspomagania pozostałych składników chodu: zachowania równowagi i odciążania przestawianej nogi. Integracja tych systemów z systemem ruchu będzie polegała m.in. na sprawdzeniu, które z ich funkcji mogą być zrealizowane z użyciem już opracowanych układów wykonawczych i pomiarowych, a które wymagają skonstruowania dodatkowych. Istotnym zagadnieniem będzie także rozstrzygnięcie stopnia integracji jednostek sterujących poszczególne systemy i ich oprogramowania. Nadrzędnym kryterium będzie w tym przypadku bezpieczeństwo użytkowników.

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

Bibliografia

1. Gawrysiak M.: *Mechatronika i projektowanie mechatroniczne*. Politechnika Białostocka. Rozprawy Naukowe nr 44. Białystok 1997
2. Goffer A.: *Gait-locomotor apparatus*. Opis patentowy EP 1260201B1, 10.12.2008
3. Guizzo E., Goldstein H.: *The rise of the body bots*. IEEE Spectrum, vol. 42, no. 10, s. 50-56, 2005
4. Kawamoto H., Lee S., Kanbe S., Sankai Y.: *Power Assist Method for HAL-3 using EMG-based Feedback Controller*. Proc. IEEE International Conference on "Man and Cybernetics Systems", s.1648-1653, 2003
5. Kiel E. (ed.): *Drive solutions. Mechatronics for Production and Logistics*. Springer. Berlin 2008
6. Pons J. L.: *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*, John Wiley & Sons, Chichester 2008
7. Pratt J. E., Krupp B. T., Morse C. J., Collins S. H.: *The RoboKnee: An exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking*, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, s. 2430-2435, 2004
8. Sankai Y.: *Leading Edge of Cybernetics: Robot Suit HAL*, SICE-ICASE International Joint Conference, 2006
9. www.argomedtec.com (dostęp 21.03.2010)

ORTHOTIC ROBOT AS A MECHATRONIC SYSTEM

Abstract: Mechatronics is presently the dominating concept of designing machines and devices. High speeds of data acquisition and processing achieved in microprocessor controllers used in such systems make possible to employ mechatronic devices in quite new fields. This also refers to the medical domain. Wearable robots are one of the most spectacular examples. They are person-oriented robots that can be defined as those worn by human operators, whether to supplement the function of a limb or to replace it completely. The authors have recently started with a large project aimed at development of orthotic robot for people with paresis of lower limbs. In the paper there is a functional structure of such device proposed as well as review of similar systems being developed around the world.

Keywords: human gait, orthotic robots, mechatronic systems