

Tadeusz MIKOŁAJCZYK, Paweł WALKOWIAK, Marika SKORNIA

## **EGZOSZKIELET KOŃCZYNY GÓRNEJ O JEDNYM STOPNIU SWOBODY**

**Streszczenie:** Efektywność rehabilitacji jest ściśle powiązana z odpowiednio dobraną terapią. Kuracja ta może być wykonywana poprzez wyspecjalizowany personel bądź zastosowanie zautomatyzowanych urządzeń. Takim stosowanym w różnych konfiguracjach urządzeniem jest egzoszkielet. Jest to swego rodzaju kombinon z zakładany na użytkownika, umożliwiający wspomaganie bądź nawet zastąpienie motoryki człowieka. W pracy przedstawiono propozycję egzoszkieletu o 1 stopniu swobody, zapewniającego rehabilitację kończyny górnej w stawie łokciowym. Sterowanie odbywa się za pomocą silnika krokowego, co zapewnia dużą dokładność w realizacji zaprogramowanych ruchów.

**Słowa kluczowe:** egzoszkielet kończyny górnej, staw łokciowy, silnik krokowy, sterowanie, rehabilitacja

### **1. WPROWADZENIE**

Uszkodzenia i choroby narządów ruchu przodują w statystyce osób niepełnosprawnych, sięgając ponad 50% populacji niezależnie od grupy wiekowej [4]. Coraz większa wiedza z zakresu anatomii człowieka oraz postęp technologiczny pozwalają na tworzenie nowych oraz bardziej zaawansowanych i skutecznych rozwiązań wspomagających bądź też zastępujących czynności motoryczne ludzi.

Egzoszkielet (ang. *exoskeleton*) czyli zewnętrzny szkielet w postaci powłoki zakładanej na człowieka ma na celu wspomaganie lub zastąpienie ruchu [6]. Konstrukcja ta mocowana jest do odpowiednich elementów ciała i zasilana najczęściej przez akumulatory [7]. Egzoszkielety wyposażone są w efekторы, których zadaniem jest dostarczenie przynajmniej części energii do wybranej kończyny, współpracując przy tym z człowiekiem [8]. Stosuje się napędy z użyciem silników elektrycznych, systemy siłowników hydraulicznych bądź pneumatycznych. Zastosowanie znalazły również napędy ultradźwiękowe [11].

W pracy przedstawiono wybrane rozwiązania w zakresie tematyki egzoszkieletów oraz zaprezentowano własny projekt egzoszkieletu kończyny górnej o jednym stopniu swobody ze sterowaniem ruchu w stawie łokciowym.

---

dr inż. Tadeusz MIKOŁAJCZYK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: [tami@utp.edu.pl](mailto:tami@utp.edu.pl), [tadeusz.mikolajczyk@utp.edu.pl](mailto:tadeusz.mikolajczyk@utp.edu.pl)

inż. Paweł WALKOWIAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, e-mail: [pawel.walkowiak1992@gmail.com](mailto:pawel.walkowiak1992@gmail.com)

inż. Marika SKORNIA, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, e-mail: [maja2105@wp.pl](mailto:maja2105@wp.pl)

## 2. PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH ROZWIĄZAŃ

Pierwsze prace nad egzozszkieletem sięgają lat 60. XX wieku, kiedy firma General Electric wyprodukowała kombinezon o nazwie „Hardiman”. Był on za ciężki, systemy sterujące pracowały nieprecyzyjnie, a z powodu ograniczeń technicznych nie można było kontynuować prac nad projektem [3]. Do doświadczeń powrócono dopiero pod koniec lat 90. XX wieku, gdy DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) zainteresowała się tą dziedziną. Realizowano dwa projekty badawcze:

- „Exoskeletons for human performance augmentation” (2001-2007),
- „Army program executive office soldier” (od 2008 r.).

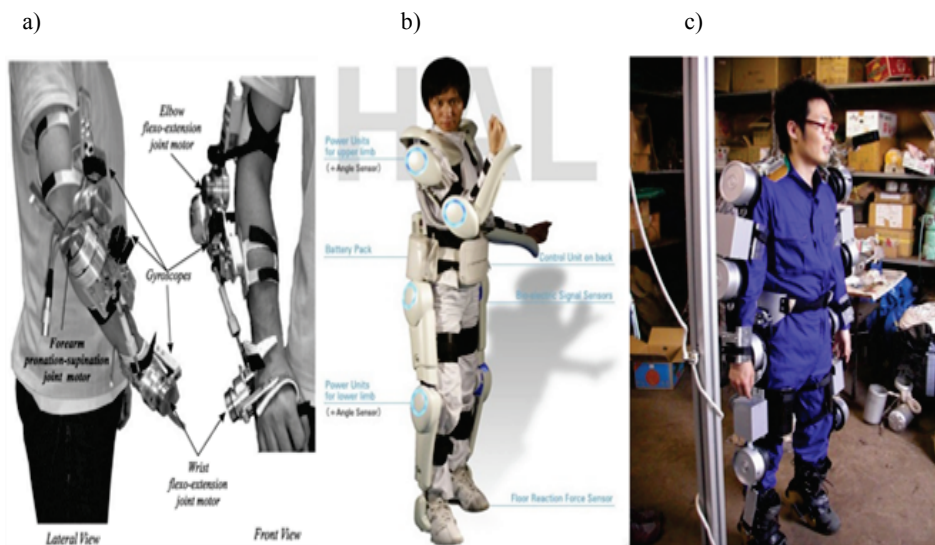
Efektem tych programów, w Sarcos Research Corporation, był amerykański egzozszkielet wojskowy. Rozwiązanie to było inspiracją kolejnych działań w tej dziedzinie na całym świecie [8].

W ostatnich latach powstało wiele różnorodnych projektów dotyczących egzozszkieletów kończyn górnych i dolnych oraz kompleksowych. Część z nich dotyczy zwiększenia siły czy sprawności ludzkiej, ale zastanawiano się również nad tematyką rehabilitacji czy też zastąpienia kończyn człowieka.

Jednym z rozwiązań obecnych na rynku jest WOTAS (Wearable Orthosis for Tremor Assesment and Suppression – rys. 1a). Egzozszkielet ten umożliwia zastosowanie dynamicznych sił wewnętrznych bez jakiegokolwiek odniesienia zewnętrznego na kończynie górnej. Urządzenie ma 3 stopnie swobody wspierane czujnikami kinematycznymi i kinetycznymi [10].

Innym projektem powstałym w Japonii w celu wspierania i rozwijania zdolności fizycznych użytkowników jest HAL-5 (Hybrid Assistive Limb – rys. 1b), opracowany z myślą o poprawie dobrostanu opieki medycznej oraz o wspomaganie w dziedzinach wymagających dużego wysiłku fizycznego. Egzozszkielet wyposażony jest w czujniki rejestrujące bioelektryczne sygnały generowane przez aktywność mięśni. Na podstawie zebranych informacji jednostka napędowa uaktywnia moduły wspierające ruch [5].

Kolejne rozwiązanie opracowane zostało przez profesora Shigeki Toyama do wspomaganie ludzi starszych pracujących na farmach. Wearable Agri Robot (rys. 1c) wyposażony jest w silniki ultradźwiękowe zamocowane na wysokości ramion, łokci, pasa i kolan, pozwalające na podnoszenie przedmiotów ważących do 20 kg. Wagę egzozszkieletu szacuje się na 26 kg, lecz producent zapewnia, że trwają prace nad jej redukcją [11].



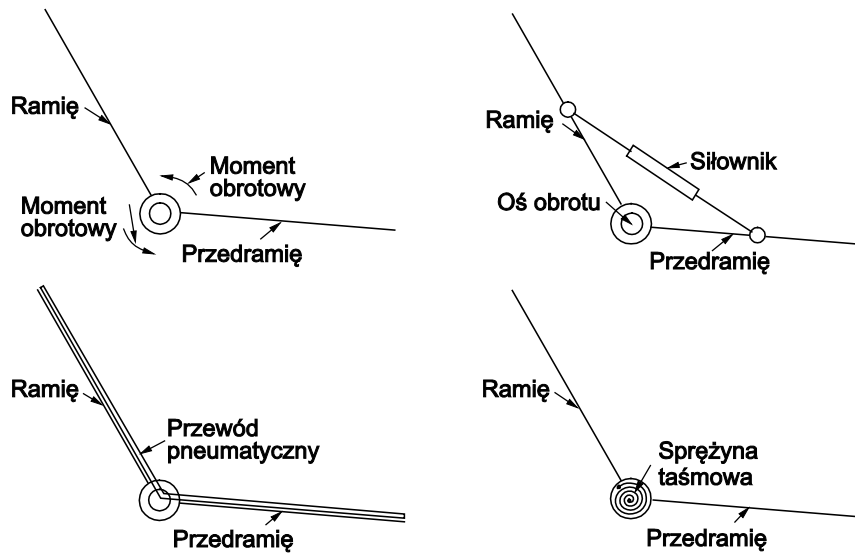
Rys. 1. Wybrane modele egzoskieletów: a) WOTAS Exoskeleton [9],  
 b) HAL-5 Exoskeleton [10], c) Wearable Agri Robot [11]  
 Fig. 1. Some models of exoskeleton: a) WOTAS Exoskeleton [9],  
 b) HAL-5 Exoskeleton [10], c) Wearable Agri Robot [11]

### 3. EGZOSKIELET KOŃCZYNY GÓRNEJ

Celem prowadzonych prac było opracowanie modelu egzoskieletu kończyny górnej, zapewniającego wspomaganie ruchu w stawie łokciowym. W pierwszej fazie projektowania egzoskieletu opracowano koncepcje napędu ruchu w stawie łokciowym, zilustrowanego na rysunku 2. Wstępne propozycje obejmowały różne rozwiązania napędu lub wspomagania ruchu.

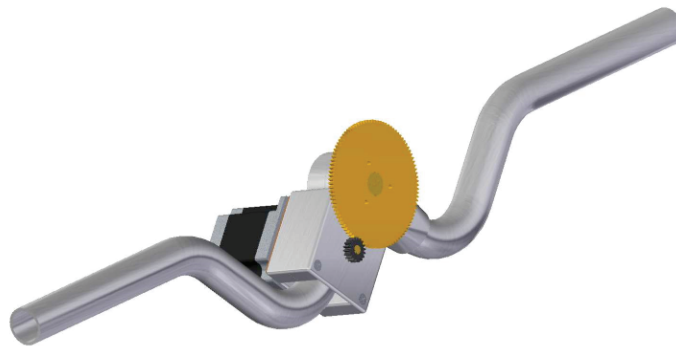
Rozpatrywano rozwiązania z zastosowaniem momentu obrotowego w łokciu, stosowanie różnego typu siłowników pneumatycznych zapewniających ruch zgięcia i wyprostu kończyny czy też wspomaganie mechaniczne (rys. 2).

Na podstawie analizy przedstawionych koncepcji z uwagi na możliwości sterowania, a także biorąc pod uwagę możliwość wykonania zdecydowano o realizacji koncepcji z wykorzystaniem momentu obrotowego (rys. 2a). Do napędu wybrano silnik krokowy o momencie obrotowym 1 Nm. W celu zwiększenia momentu obrotowego układu napędowego zastosowano dodatkowe przełożenie. Z uwagi na prototypowy charakter rozwiązania oraz dostępność elementów użyto przekładni zębatej.



Rys. 2. Koncepty egzozszkieletu kończyny górnej  
Fig. 2. Ideas of upper limb exoskeleton

W celu zapewnienia optymalnych własności mechanicznych egzozszkieletu do jego konstrukcji zastosowano rury ze stopu PA6, zapewniające odpowiednią wytrzymałość, niską masę oraz walory estetyczne. Za pomocą programu Solid Edge opracowano model wirtualny konstrukcji (rys. 3).



Rys. 3. Model wirtualny prototypu egzozszkieletu kończyny górnej  
wykonany w środowisku Solid Edge  
Fig. 3. Virtual model of upper limb exoskeleton made using Solid Edge

Przegub wykonano z wykorzystaniem elementów przegubu z zestawu do mocowań stelaży z rur o średnicy 25 mm. Wykonano specjalny trzpień oraz łożyskowanie, co umożliwi obrót elementów egzozszkieletu. Z uwagi na konieczność odpowiedniego zakresu ruchu zastosowano specjalne wygięcie końcówek rur. W ten sposób zapewniono wymagany zakres ruchu od 30°-180°.

Do napędu egzoszkieletu wykorzystano silnik krokowy, którego obudowę połączono z „ramieniem” egzoszkieletu. Na osi silnika zastosowano koło zębate współpracujące z kołem zębatym połączonym z „przedramieniem” egzoszkieletu. Uzyskano w ten sposób przekładnię zębatą o przełożeniu 1:5, zwiększającą moment przekazywany przez silnik krokowy. Ponieważ minimalny skok silnika wynosi  $1,8^\circ$  przy pracy pełno krokowej minimalny ruch przedramienia to  $0,36^\circ$ . Przy ustawieniu  $\frac{1}{2}$  kroku minimalny ruch to  $0,18^\circ$ . Wykonany prototyp egzoszkieletu przedstawiono na rysunku 4.

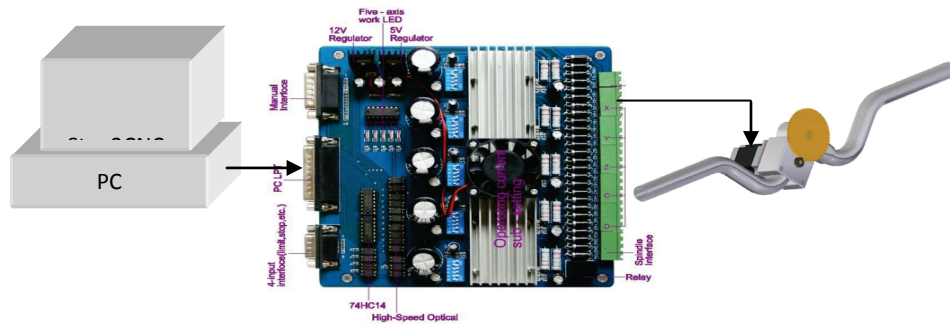


Rys. 4. Prototyp egzoszkieletu kończyny górnej  
Fig. 4. Prototype of upper limb exoskeleton

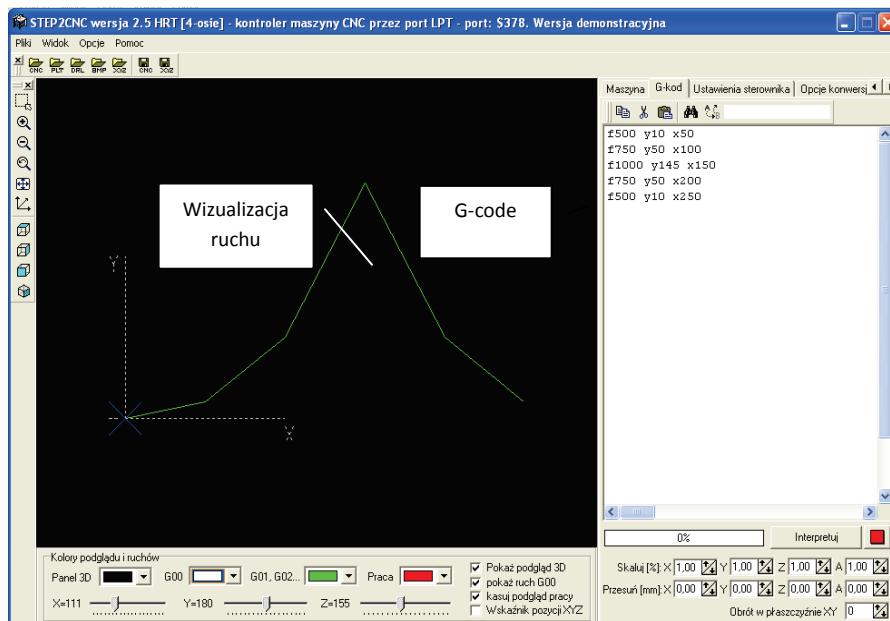
Sterowanie egzoszkieletem odbywa się przez sterownik TB6560 (rys. 5) podłączony do komputera portem LPT. Całość zasilana jest zasilaczem przemysłowym o mocy 600W, napięciu wyjściowym do 36V i prądem wyjściowym rzędu 16A. Wykorzystano program do sterowania obrabiarek sterowanych numerycznie *Step2CNC* (rys. 6). Program umożliwia zarówno sterowanie manualne z użyciem przycisków panelu sterowania ręcznego jak i sterowanie automatyczne. Sterowanie automatyczne odbywa się z użyciem pliku G-code. Stosowane kody umożliwiają sterowanie położeniem kątowym przedramienia, prędkością ruchu, a także programowanie przerw w ruchu. Plik sterowania może być przygotowany zarówno w edytorze programu *Step2CNC*, jak i opracowany jako plik tekstowy w dowolnym edytorze (np. *Notepad*). Plik sterujący może być wtedy wprowadzony z pamięci komputera do programu. Dzięki zastosowaniu tego programu w trybie automatycznym możliwe jest zastosowanie pewnej sekwencji ruchów, które zostaną wykonane przez silnik krokowy. Przy zastosowaniu w zapisie kodu dodatkowej osi (wirtualnie) uzyskano w prosty sposób wizualizację parametrów ruchu (rys. 6).

Przeprowadzono próby działania egzoszkieletu z wykorzystaniem panelu sterowania manualnego programu *Step2CNC*, jak i G-code. Zastosowanie kodu

sterowania umożliwiło automatyzację pracy urządzenia w zakresie programowania położenia przedramienia, prędkości przemieszczeń i przerw.



Rys. 5. System sterowania egzoszkieletu  
Fig. 5. Control system of exoskeleton



Rys. 6. Interfejs programu Step2CNC z wizualizacją ruchu  
Fig. 6. View of Step2CNC software with visualization of move

Przeprowadzone próby egzoszkieletu potwierdziły poprawność działania. Zastosowany w układzie wyłącznik krańcowy zapewniał niezawodną kalibrację pozycji początkowej (wyprostowane przedramię kąt  $180^\circ$ ). W zakładce ustawienia programu ustalono parametr sterowanej osi umożliwiające sterowanie stosowanie do wprowadzonej w parametrze pliku G-code wartości kąta. Wymagało to określenia liczby kroków silnika krokowego z uwzględnieniem zastosowanego w konstrukcji przełożenia.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie przeglądu części literaturowej oraz części własnej sformułowano następujące wnioski:

- zaprojektowany układ napędowy z zastosowaniem silnika krokowego zapewnia precyzyjne pozycjonowanie i powtarzalność ruchu (dokładność ok. 3-5% kroku), szeroki zakres prędkości obrotowych oraz pracę z pełnym momentem w stanie spoczynku (o ile obecne jest zasilanie na uzwojeniach),
- materiały wykorzystane do budowy egzoszkieletu oraz wybrany profil rurowy zapewniają dobre parametry wytrzymałościowe przy stosunkowo niskiej masie – około 2 kg,
- prosta konstrukcja oraz wykorzystane gotowe komponenty umożliwiły stosunkowo niski koszt wykonania,
- do budowy układu sterowania wykorzystano ogólnie dostępne niedrogie komponenty oraz komputer PC,
- zastosowany program do sterowania egzoszkieletem *Step2CNC* pozwala na dokładne określenie kąta jakie ramię ma uzyskać, umożliwia zaprogramowanie sekwencji ruchów przy zmiennych prędkościach obrotowych,
- wykorzystanie programu *Step2CNC* umożliwia dogodne budowanie układów z automatycznym sterowaniem napędów w 4 osiach,
- celowe jest prowadzenie dalszych prac w zakresie opracowania ergonomicznych elementów łączących egzoszkielec z ramieniem pacjenta, zwiększenia liczby stopni swobody, a także opracowania własnego programu sterowania.

#### LITERATURA

- [1] Akcesoria.cnc, pobrano 01.05.2015, <http://www.akcesoria.cnc.info.pl/pliki/step2cnc/591x411xstep2cnc.png.pagespeed.ic.6AjMkw2YPP.png>
- [2] aliimg.com, pobrano 01.05.2015, [http://hz01.i.aliimg.com/img/pb/667/817/388/388817667\\_405.jpg](http://hz01.i.aliimg.com/img/pb/667/817/388/388817667_405.jpg).
- [3] CIĘŻKOWSKI P., MIROŚLAW T.: Analiza porównawcza systemów transportu typu – egzoszkielec. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 4(95), 2013, 31-39.
- [4] Europejskie Ankiety Badanie Zdrowia (EHIS) 2009, GUS.
- [5] KAWAMOTO H., KAMIBAYASHI K., NAKATA Y. et al.: Pilot study of locomotion improvement using hybrid assistive limb in chronic stroke patients. BMC Neurology 13(141), 2013, pobrano 01.05.2015, <http://www.biomedcentral.com/1471-2377/13/131>.
- [6] MIKOŁAJEWSKA E., MIKOŁAJEWSKI D.: Egzoszkielety we współczesnych środowiskach zintegrowanych. Zeszyty Naukowe WSOWL 4, 2011, 246-253.
- [7] MIKOŁAJEWSKA E., MIKOŁAJEWSKI D.: Zastosowania automatyki i robotyki w wózkach dla niepełnosprawnych i egzoszkielec medycznych. Zeszyty Naukowe WSOWL 5, 2011, 58-63.
- [8] MIKOŁAJEWSKA E., MIKOŁAJEWSKI D.: Możliwości wykorzystania egzoszkieletu medycznego jako nowoczesnej formy terapii. Państwowy Fundusz Rehabilitacji Osób Niepełnosprawnych, Niepełnosprawność – zagadnienia, problemy, rozwiązania 4, 2012, 121-141.

- [9] PONS J.L., ROCON E., RUIZ A.F., MORENO J.C.: Upper-Limb Robotic Rehabilitation Exoskeleton: Tremor Suppression. *Rehabilitation Robotics*, pobrano 12.15.2014, [http://www.intechopen.com/books/rehabilitation\\_robotics/upperlimb\\_robotic\\_rehabilitation\\_exoskeleton\\_tremor\\_suppression](http://www.intechopen.com/books/rehabilitation_robotics/upperlimb_robotic_rehabilitation_exoskeleton_tremor_suppression).
- [10] Robaid.com, pobrano 26.06.2015, from Robaid.com, <http://www.robaid.com/bionics/cyberdyne-hal-5-exoskeleton-robot.htm>.
- [11] TOYAMA S.: Toyama Research. Pobrano 22.04.2015, [http://www.tuat.ac.jp/~toyama/research\\_assistancesuitE.htm](http://www.tuat.ac.jp/~toyama/research_assistancesuitE.htm).

### **UPPER LIMB EXOSKELETON WITH ONE DEGREE OF FREEDOM**

**Summary:** The effectiveness of rehabilitation is closely linked with suitably chosen therapy. The treatment can be performed only by specialized personnel or through the use of automated devices. So there is a possibility of solution which is exoskeleton. It is the kind of suit that allows the user assumed to support or even replace the human motor. The paper presents a proposal to the exoskeleton with 1 degree of freedom providing upper extremity rehabilitation in the elbow. Control is via stepper motor which ensures high accuracy in the implementation of programmed movements.

**Key words:** upper limb exoskeleton, elbow, stepper motor, control, rehabilitation