

Emilia MIKOŁAJEWSKA*
Dariusz MIKOŁAJEWSKI**

EGZOSZKIELETY WE WSPÓŁCZESNYCH ŚRODOWISKACH ZINTEGROWANYCH

Egzoszkielec to rodzaj robota zakładanego na użytkownika w formie kombinezonu, wspomagającego lub zastępującego jego ruch. Jego szczególne właściwości mogą doprowadzić do istotnych zmian w wielu obszarach, w tym w rehabilitacji i na polu walki. Funkcjonalność egzoszkielec może być rozszerzona przez środowiska zintegrowane, w tym przedstawione zintegrowane środowisko osoby niepełnosprawnej oraz wyposażenie żołnierza XXI wieku. Artykuł stanowi próbę oceny, w jakim stopniu wykorzystuje się możliwości w tym obszarze, przedstawiając również kierunki dalszych badań i zagrożenia.

Słowa kluczowe: automatyka i robotyka, egzoszkielec, systemy zintegrowane, zdolność sieciocentryczna

WSTĘP

Egzoszkielec (ang. exoskeleton, dosł. szkielec zewnętrzny) to szczególna forma robota zakładana na użytkownika w formie kombinezonu/pancerza [1, 2, 3, 4]. Ta metalowo-plastikowa konstrukcja wyposażona w różne formy efektorów (najczęściej siłowników hydraulicznych lub silników elektrycznych) wprawiana jest w ruch, współdziałając z zamiarem ruchu użytkownika (operatora, pilota egzoszkielec). Ten zamiar ruchu odczytywany jest zarówno z czujników elektromiograficznych na skórze użytkownika, jak i czujników żyroskopowych, przyspieszenia, mierzących siły nacisku na podłoże, kąty zgięcia w stawach oraz inne parametry, z zachowaniem przez system sterujący zaprogramowanych wcześniej naturalnych (lub zbliżonych do naturalnych) wzorców ruchu użytkownika, płynności jego ruchów oraz bezpieczeństwa całego współdziałającego układu człowiek-egzoszkielec.

* dr Emilia MIKOŁAJEWSKA – Klinika Rehabilitacji, 10 Wojskowy Szpital Kliniczny z Polikliniką SP ZOZ w Bydgoszczy

** mjr rez. mgr inż. Dariusz MIKOŁAJEWSKI – Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

Jako ciekawostkę można przytoczyć fakt, że już w 1890 r. w USA N. Jagn opatentował „apparatus for facilitating walking, running and jumping” – wykonanego z drewna protoplastę dzisiejszego egzoszkieletu. Nowszą inspiracją dla większości twórców egzoszkieletów są urządzenia opisane w powieści science-fiction R. A. Heinleina „Starship troopers” („Żołnierze kosmosu”) z 1959 r.

1. MOŻLIWOŚCI I OGRANICZENIA EGZOSZKIELETÓW

Pomimo badań z zakresu wojskowego wykorzystania egzoszkieletów, prowadzonych już od lat 60-tych XX w. zarówno w krajach NATO, jak i Układu Warszawskiego (ZSRR, Jugosławia), najwcześniej wyodrębniła się grupa komercyjnych egzoszkieletów medycznych. Zgodnie z bazą danych robotyki medycznej MeRoDa [5] dwa najważniejsze egzoszkielety medyczne to cztero kończynowy japoński HAL5 produkowany przez firmę Cyberdyne Inc. [2, 6, 7] oraz izraelski ReWalk (Argo Medical Technologies) na kończyny dolne [2]. O ile ten pierwszy jest dostępny w wersji tylko na nogi lub cztero kończynowej (a wkrótce być może pediatrycznej), to drugi, przy sprawnych rękach, umożliwia np. kierowanie pojazdami mechanicznymi, rozszerzając jego wykorzystanie przez pacjentów w czynnościach codziennego życia.

Ograniczenia techniczne sprawiły, że dynamiczny powrót do egzoszkieletów wojskowych nastąpił dopiero w latach 90-tych XX wieku, głównie za sprawą projektów finansowanych przez DARPA. Zaowocowały one opracowaniem szeregu rozwiązań, wśród których wiodące rolę odgrywają:

- XOS (Sarcos Raytheon);
- HULC (Lockheed Martin i Berkeley Bionics).

Znaczna część rozwiązań z projektów wojskowych przeszła do robotyki cywilnej, w tym medycznej, również jako cywilne egzoszkielety ExoHiker i ExoClimber. Według oficjalnych danych, egzoszkielety medyczne, ze względu m.in. na inny rodzaj wymagań im stawianych, są jedynymi dostępnymi do użytku (HAL5 w sprzedaży od 2007 r. za cenę od 12-19 tys. USD w zależności od wersji). Należy jednak zaznaczyć, że liczba projektów związanych z egzoszkieletami wojskowymi może być duża, a postęp badań w szeregu państw mogących dysponować tą technologią (Chiny, Indie, Izrael) nie jest znany.

Wykorzystanie egzoszkieletów oraz ich cechy użytkowe są silnie uwarunkowane przeznaczeniem, co ilustruje porównanie egzoszkieletów medycznych i wojskowych (tabela 1). Należy zaznaczyć, że wraz z rozwojem egzoszkieletów podziały te będą się pogłębiać i uszczegóławiać, dochodząc być może np. do podziału egzoszkieletów wojskowych na ofensywne, do akcji ratowniczych, pływające, ratujące życie katapultowanymi pilotom itp. Zdolności obsługi (doboru, szybkiego dopasowania, szkolenia użytkownika, serwisowania) oraz wykorzystania wszystkich walorów egzoszkieletu w warunkach przyszłego pola walki mogą stać się znaczącą przewagą technologiczną, przekładającą się na sukces taktyczny, a nawet operacyjny. Jest to możliwe zwłaszcza w sytuacjach, w których małe grupy doskonale wyszkolonych i wyposażonych żołnierzy będą wykonywały precyzyjne uderzenia w ścisłym reżimie czasowym.

Tabela 1. Egzoszkielety w zastosowaniach cywilnych (medycznych) i wojskowych – porównanie [1, 2, 3, 4, 6]

Zastosowania medyczne	Zastosowania wojskowe
<p>1) Dla osób chorych: tryb rehabilitacyjny (zarówno w wersji czterokończynowej, jak i tylko na kończyny dolne) – wspomaganie osłabionych oraz zastępowanie niesprawnych mięśni pacjentów niepełnosprawnych, przewlekle chorych i w podeszłym wieku, wspomaganie naturalnej motoryki dwunożnej zamiast protezy chodu w formie wózka inwalidzkiego, możliwość wsparcia ruchów kończyn górnych (w przyszłości – być może również funkcji pełnego chwytu dłonią), z możliwością użycia tymczasowego (jako robot rehabilitacyjny wspomagający proces powrotu do zdrowia) oraz na stałe (np. jako proteza funkcji chodu).</p> <p>2) Dla osób zdrowych: tryb wsparcia – wsparcie personelu medycznego oraz rodziny/opiekunów osób niepełnosprawnych, ciężko chorych i w podeszłym wieku w bezpiecznej realizacji zadań wymagających dużego wysiłku fizycznego, takich jak zmiana pozycji lub przenoszenie chorego.</p> <p>Należy zauważyć, że część pacjentów grup docelowych nie będzie w stanie korzystać z egzoszkieletu ze względu na deficyty poznawcze, problemy z pamięcią lub zachowaniem działania układu nerwowego w stopniu wystarczającym do właściwego sterowania egzoszkieletem (np. zaburzenia równowagi). Niemniej jednak, ze względu na rosnące wykorzystanie egzoszkieletów medycznych w krajach wiodących technologicznie (Japonia, USA) oraz zaawansowanie badań klinicznych egzoszkieletów medycznych prowadzonych w Danii i Szwecji, planuje się wprowadzenie podobnych rozwiązań w Polsce.</p>	<p>Dla osób zdrowych, przy zachowaniu wszystkich zalet dwunożnego poruszania się, również w trudnym terenie (góry, tereny podmokłe i bagienne, długie podejścia, również w terenie zurbanizowanym, np. wielokrotne pokonywanie schodów):</p> <p>1) Egzoszkielety na kończyny dolne – jako wyposażenie indywidualnego żołnierza lub małych grup żołnierzy (w tym wojsk specjalnych), zarówno zwiększające siłę, wytrzymałość, szybkość marszu oraz zasięg, jak i wspomagające przenoszenie ciężkich ładunków lub stanowiące zrobotyzowane platformy dla systemów uzbrojenia, łączności itp.</p> <p>2) Egzoszkielety czterokończynowe – jak wyżej, a dodatkowo wielofunkcyjne narzędzie, również w akcjach ratunkowych i ewakuacyjnych (CASEVAC, MEDEVAC).</p> <p>Egzoszkielet, po osiągnięciu odporności na ostrzał oraz inne formy oddziaływania przeciwnika (ataki cybernetyczne) i środowiska (zdolność brodenia itd.), będzie prawdopodobnie stanowił bardzo ważny element szeregu programów tzw. żołnierza XXI wieku, takich jako PEO Soldier (DARPA, USA).</p>

Źródło: Opracowanie własne

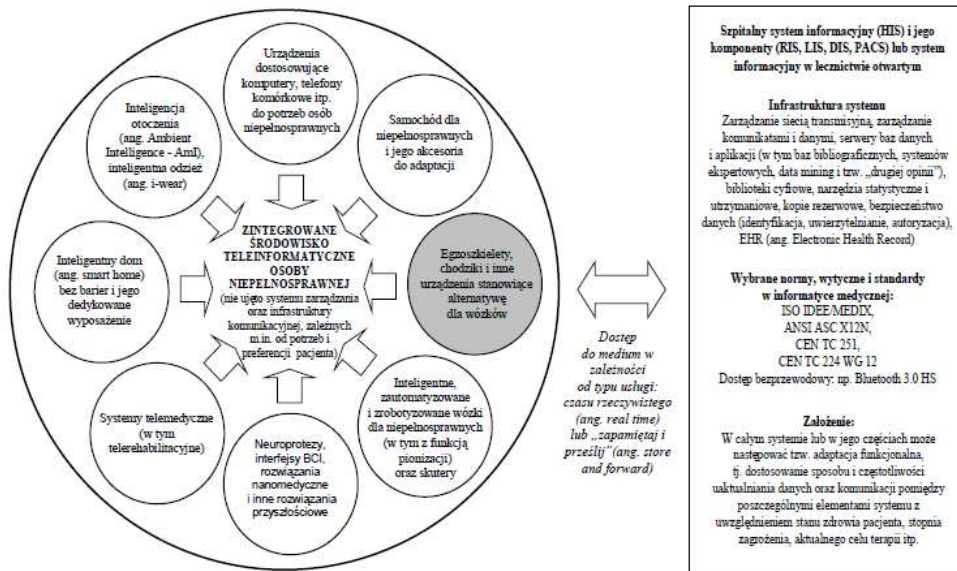
2. ROZSZERZANIE FUNKCJONALNOŚCI EGZOSZKIELETÓW PRZEZ ŚRODOWISKA ZINTEGROWANE

Integracja egzoszkieletów w szersze środowiska teleinformatyczne pozwala znacząco rozszerzyć ich funkcjonalność przede wszystkim o funkcje geolokalizacji i telemedyczne (w tym monitorowanie czynności życiowych i wsparcie utrzymania życia sytuacjach zdrowia w sytuacjach alarmowych) oraz nadzoru technicznego funkcjonowania egzoszkieletu. Na zasadzie synergii przekłada się to na efektywniejsze i elastyczniejsze wykorzystanie możliwości egzoszkieletu oraz pozwala lepiej dopasować rozwiązanie do aktualnych potrzeb i możliwości, wpływając również na obniżenie ostatecznych kosztów. W egzoszkieletach medycznych proponowane rozwiązania obejmują przede wszystkim włączenie egzoszkieletu w zintegrowane środowiska osoby niepełnosprawnej (rys. 1a), efektywnie współpracujące z obecnie funkcjonującymi systemami informacyjnymi w służbie zdrowia, takimi jak szpitalne

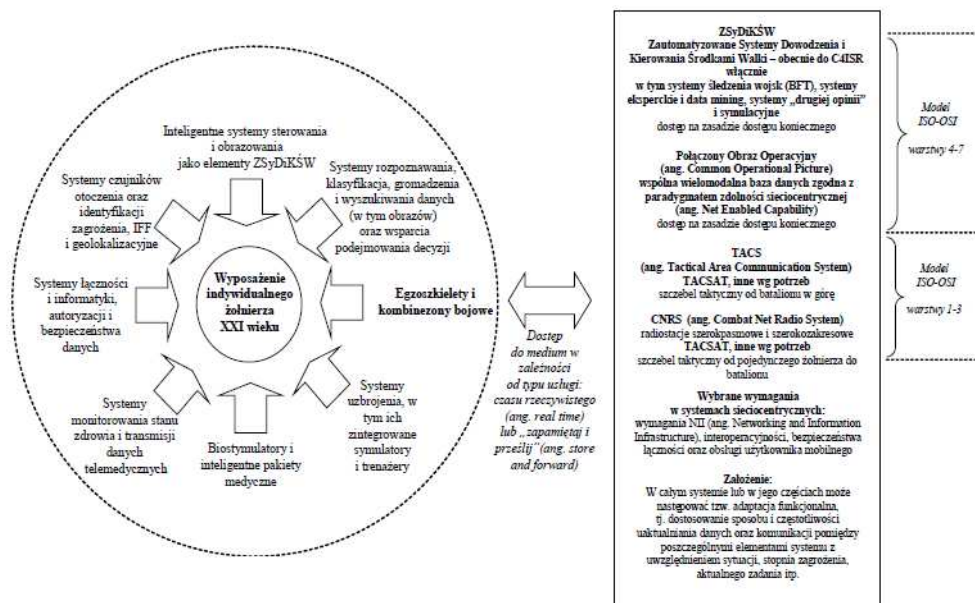
EGZOSZKIELETY WE WSPÓŁCZESNYCH ŚRODOWISKACH ZINTEGROWANYCH

systemy informacyjne (ang. Hospital Information System – HIS) czy systemy informacyjne w leczeniu otwartym (w przypadku opieki ambulatoryjnej lub domowej). Egzoszkielety wojskowe wpisują się w wyposażenie tzw. żołnierza XXI wieku oraz infrastrukturę sieciocentrycznego pola walki (rys. 1b).

a)



b)



Rys. 1. Miejsce egzoszkieletu w wybranych środowiskach zintegrowanych:
 a) zintegrowane środowisko teleinformatyczne osoby niepełnosprawnej [7, 8, 9],
 b) sieciocentryczne ZSyDiKSW [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]
 (przykładowe z wielu możliwych wariantów)

Źródło: Opracowanie własne

Obecnie część cywilnych rozwiązań zintegrowanych wykorzystuje elementy sprawdzone w środowiskach inteligentnego domu (ang. smart home) i inteligentnego ubrania (ang. i-wear), używając do komunikacji istniejących interfejsów bezprzewodowych (WLAN, Bluetooth 3.0 HS), internetowego dostępu szerokopasmowego lub systemów telefonii komórkowej. Przyszłością środowisk zintegrowanych wydają się rozwiązania Ambient Intelligence (AmI), oparte na pełnej integracji agentów (oprogramowania) z elementami infrastruktury (ściany, szyby, chodnik, jezdnia) i wyposażenia (meble, sprzęt AGD, zabawki) w ramach tworzonych ad-hoc sieci komunikacyjnych o rozproszonym sterowaniu i inteligentnych intuicyjnych wielomodalnych interfejsach użytkownika [7].

3. KIERUNKI ROZWOJU

Najważniejsze kierunki rozwoju egzoszkieleatów obejmują:

- dalsze doskonalenie procesu odczytywania zamiaru ruchu oraz przekładania go na sterowanie egzoszkieleatem;
- rozwój procedur doboru, dopasowania oraz przyuczenia użytkownika do wykorzystania egzoszkieleatu oraz próby automatyzacji i skrócenia czasu trwania tego procesu;
- wydłużenie czasu pracy bez ładowania źródeł zasilania do pełnego dnia - obecnie HAL5 działa ok. 2,5 godziny, pozostałe egzoszkieleaty osiągają znacznie gorsze wyniki);
- rozwój wsparcia kończyn górnych, w tym funkcji pełnego chwytu dłonią o pięciu palcach - obecnie standardem są chwytaki jedynie trójpalczaste [25];
- inteligentne systemy sterowania;
- szersze wykorzystanie interfejsów mózg-komputer (ang. brain-computer interface – BCI) jako efektywniejszego i bezpieczniejszego sposobu sterowania nie tylko egzoszkieleatem, ale wszystkimi zintegrowanymi z nim urządzeniami (w tym integracja: egzoszkieleat medyczny – neuroproteza) [26, 27].

W przypadku egzoszkieleatów medycznych nastąpi, być może, podział na egzoszkieleaty dla opiekunów/personelu medycznego i dla pacjentów. Wynika on zarówno z tendencji demograficznych (starzenie się społeczeństwa w krajach rozwiniętych), jak również z rosnącej liczby osób niepełnosprawnych i przewlekle chorych, związanej z postępem medycyny i zwiększoną przeżywalnością ciężkich wypadków, zatruc, chorób wrodzonych i metabolicznych. Leczenie ratuje tu życie, ale już nie zapewnia powrotu do poprzedniego poziomu sprawności. Liczba osób wymagających opieki będzie zatem rosła, ale znacznie wolniej będzie rosła liczba personelu medycznego (który w dodatku będzie musiał się dłużej uczyć wykorzystania bardziej zaawansowanych technologii medycznych), tak więc wzrośnie obciążenie np. rehabilitacją ambulatoryjną i domową, w tym telerehabilitacją. Dodatkowo zdecydowana większość opiekunów będzie w stanie używać egzoszkieleatu (w trybie wsparcia), podczas gdy znaczna grupa pacjentów (szacowana nawet na 10 – 30%), w tym z deficytami neurologicznymi, poznawczymi, demencją, nie będzie mogła korzystać z egzoszkieleatu (robota) samodzielnie ze względu na problemy ze sterowaniem oraz stwarzanie potencjalnego zagrożenia dla siebie i otoczenia.

W przypadku egzoszkieleatów wojskowych dodatkowe wyzwanie stanowi osiągnięcie odporności na oddziaływanie bronią różnego rodzaju (od ochrony życia

i zdrowia użytkownika aż po tzw. samonaprawialność) oraz zakłócenia wynikające zarówno z warunków pola walki, jak i celowego oddziaływania przeciwnika na systemy egzozszkieletu. Wyzwanie może stanowić konieczność opracowania procedur awaryjnych na wypadek:

- zranienia użytkownika egzozszkieletu;
- uszkodzenia egzozszkieletu w sposób wymagający czasowego lub stałego wyłączenia awaryjnego;
- zmiany użytkownika w warunkach polowych;
- utrzymania gotowości bojowej egzozszkieletu w warunkach polowych.

Nie ulega wątpliwości, że tak jak szersze wprowadzenie egzozszkieletów medycznych wymusi zmiany w organizacji służby zdrowia i procedurach medycznych związanych przede wszystkim z rehabilitacją, tak wprowadzenie egzozszkieletów na pole walki spowoduje zmiany w planowaniu, prowadzeniu i zabezpieczeniu działań na szczeblu taktycznym i operacyjnym. Dostępne staną się nowe środki realizacji dotychczasowych zadań, co może odmienić poglądy przede wszystkim na wykorzystanie małych, szybko poruszających się grup żołnierzy, wyposażonych w nowoczesne środki rażenia i dowodzenia oraz poszerzoną świadomość operacyjną. Wpłyne to z pewnością na dynamikę działań oraz stworzy konieczność opracowania taktyki przewidywania i przeciwdziałania takim uderzeniom przeciwnika.

Badania nad egzozszkieletami medycznymi prowadzone są również w Polsce (m.in. projekt CyberWalk), planowane są również badania kliniczne urządzeń zagranicznych. Program TYTAN prawdopodobnie nie obejmie wykorzystania egzozszkieletu.

PODSUMOWANIE

Szereg projektów prowadzonych na całym świecie nad wykorzystaniem egzozszkieletów każe rozważyć ich wszechstronne użycie w ramach systemów zintegrowanych, zarówno w systemie służby zdrowia, w warunkach sieciocentrycznego pola walki, jak i w innych możliwych zastosowaniach (akcje antyterrorystyczne, służby ratunkowe, akcje reagowania kryzysowego). Zaprezentowane przez nas wybrane przykłady nie wyczerpują wszystkich możliwości w omawianym zakresie, a dopasowanie ich do konkretnych obecnie funkcjonujących lub przyszłościowych, rozwiązań umożliwi lepsze dostosowanie do przewidywanych zadań. Na uwagę zasługuje również bezpieczeństwo wykorzystania egzozszkieletów, zarówno dla użytkowników, jak i ich otoczenia. Pomimo zaawansowanych algorytmów sterowania oraz wbudowanych procedur i wyłączników awaryjnych egzozszkielet pozostaje wciąż tylko robotem [28]. Wraz ze wzrostem nasycenia naszego otoczenia systemami teleinformatycznymi rośnie potrzeba efektywnej analizy zagrożeń i zapobiegania im u podstaw.

LITERATURA

- [1] Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Zastosowania automatyki i robotyki w wózkach dla niepełnosprawnych i egzozszkieletach medycznych*, [w:] „Pomiary Automatyka Robotyka”, nr 5/2011, s. 58 – 64.
- [2] Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Exoskeletons in neurological diseases - current and potential future applications*, [w:] “Adv Clin Exp Med”, nr 20(2)/2011, s. 227 – 233.

- [3] Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Egzoszkielec jako szczególna forma robota – zastosowania cywilne i wojskowe*, [w:] „Kwartalnik Bellona”, nr 1/2011, s. 160 – 169.
- [4] Mikołajewska E., *Neurorehabilitacja. Zaopatrzenie ortopedyczne*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2009, s. 74 – 76.
- [5] Medical Robotics Database (MeRoDA).
- [6] [online]. [dostęp: 1.08.2011]. Dostępny w Internecie: <http://www.umm.uni-heidelberg.de/apps/ortho/meroda/>.
- [7] Mikołajewska E., *Egzoszkielec HAL 5*, [w:] „Mag Pielęg Położ”, nr 5/2007, s. 42.
- [8] Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Neurorehabilitacja XXI wieku. Techniki teleinformatyczne*, Impuls, Kraków 2011.
- [9] Mikołajewska E., *Niepełnosprawność i rehabilitacja – wczoraj, dziś, jutro*, [w:] „Niepełnosprawność i Rehabilitacja”, nr 4/2010, s. 102 – 131.
- [10] Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Informatyka w służbie zdrowia*, [w:] „Mag Pielęg Położ”, nr 12/2008, s. 32.
- [11] Sabatowski Z., *Technologia GPS w procesie szkolenia SZ RP*, [w:] „Zeszyty Naukowe WSOWL”, nr 2(152)/2009, s. 65 – 73.
- [12] Becmer D., *Francuska koncepcja żołnierza przyszłości*, [w:] „Zeszyty Naukowe WSOWL”, nr 3(149)/2008, s. 55 – 68.
- [13] Szleszyński A., *Koncepcja dostosowania sieci teleinformatycznej do sieciocentrycznej wymiany informacji*, [w:] „Zeszyty Naukowe WSOWL”, nr 3(149)/2008, s. 144 – 152.
- [14] Szleszyński A., *Organizacyjny aspekt bezpieczeństwa informacji w informatycznych systemach wspomagających proces dowodzenia – zarządzania*, [w:] „Zeszyty Naukowe WSOWL”, nr 3(149)/2008, s. 117 – 128.
- [15] Witkowski M., *Tendencje rozwojowe sprzętu łączności i informatyki*, [w:] „Zeszyty Naukowe WSOWL”, 4(146)/2007, s. 17 – 32.
- [16] Kuchta D., *Zastosowanie rozmytego programowania wielokryterialnego w siłach zbrojnych*, [w:] „Zeszyty Naukowe WSOWL”, 4(146)/2007, s. 33 – 41.
- [17] Łubkowski P., Dołowski J., *Charakterystyka systemów JAŚMIN i STORCZYK 2000 w kontekście wymagań środowiska sieciocentrycznego*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr 4(652)/2008, s. 369 – 386.
- [18] Bartolomasi P., Buckman T., Campbell A. i wsp., *NATO Network Enabled Capability, Feasibility Study, vol. 1: Overview of NATO network-centric operational needs and implications for the development of net-centric solutions, version 2.0*, NATO Command, Control and Consultation Agency, 2006.
- [19] *NATO Network Enabled Capability, Feasibility Study, vol. 2: Annex C to volume II, Communication Technology For NII: Detailed report covering a strategy and roadmap for realizing an NNEC Networking and Information Infrastructure (NII), ver. 2.0*, NATO Command, Control and Consultation Agency, 2005.

- [20] Copeland P., Winkler M., *Analysis of NATO communications standards for the NNEC, Technical Note 1197, NATO Command, Control and Consultation Agency*, 2006.
- [21] Piotrowski Z., Łopatka J., Gajewski P., *Koncepcja systemu autoryzacji korespondenta radiowego*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr specjalny 2006, s. 155 – 162.
- [22] Piotrowski Z., Gajewski P., *Autoryzacja abonenta w łączach radiowych*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr specjalny 2/2007, s. 363 – 370.
- [23] Wrażeń M., *System łączności środowiska sieciocentrycznego*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr specjalny 2006, s. 163 – 176.
- [24] Antkiewicz R., Najgebauer A., Pierzchała D. i wsp., *Systemy wspomagania dowodzenia w procesie planowania działań operacyjnych: problem modelowania, projektowania i integracji*, [w:] „Biuletyn ISI WAT”, 3/2009, s. 1 – 12.
- [25] Chmielewski M., *Wykorzystanie modeli ontologicznych na potrzeby budowy wspólnego obrazu pola walki*, [w:] „Biuletyn ISI WAT”, 3/2009, s. 19 – 28.
- [26] Mianowski K., Banachowicz K., Winiarski T. i wsp., *Chwytnik wielopalczysty dla robota usługowego – konstrukcja*, [w:] „Pomiary Automatyka Robotyka”, nr 5/2011, s. 46 – 52.
- [27] Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Interfejsy mózg-komputer – zastosowania cywilne i wojskowe*, [w:] „Kwartalnik Bellona”, nr 2/2011, s. 123 – 133.
- [28] Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Inżynieria biomedyczna na polu walki*, [w:] „Kwartalnik Bellona”, nr 4/2010, s. 97 – 102.
- [29] Schmidt H., Hesse S., Bernhardt R., *Safety concept for robotic gait trainers*, [w:] “Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc”, nr 4/2004, s. 2703 – 2706.

EXOSKELETONS WITHIN CONTEMPORARY INTEGRATED ENVIRONMENTS

Summary

An exoskeleton is a kind of robot to be worn as a suit, effectively supporting or substituting the user's movements. Its distinctive features can lead to important changes in many areas, including rehabilitation and a battlefield. The functionality of exoskeletons can be extended by integrated environments, including the presented integrated IT environment of a disabled person and the equipment of the 21st century soldier. This article aims at investigating the extent to which the available opportunities are being exploited, including the directions for further research and threats.

Key words: automation, robotics, exoskeletons, integrated environments, net-enabled capability