

Marek SZKUDLAREK\*, Katharina BERENDES\*\*

## EGZOSZKIELETY W BRANŻY MOTORYZACYJNEJ

DOI: 10.21008/j.0239-9415.2019.079.13

Egzoszkielety stają się coraz bardziej interesujące dla przemysłu motoryzacyjnego, aby wspierać w sposób ergonomiczny pracowników i dodatkowo zwiększać możliwości w systemie produkcyjnym. Dziś najtrudniejszym wyzwaniem jest wykrywać, konstruować i oceniać wszystkie efekty zastosowania egzoszkieletu. Zwłaszcza ocena ergonomiczna jest jednym z głównych priorytetów związanych z integracją zewnętrznych szkieletów w przemyśle w celu oceny wszystkich istotnych wpływów.

Celem niniejszego raportu jest prezentacja obecnie dostępnych egzoszkieleatów oferowanych dla branży motoryzacyjnej. W artykule ukazano, z jakimi problemami i wyzwaniami mają do czynienia ich konstruktorzy, użytkownicy oraz w jakim kierunku zmierza rozwój tych produktów.

**Słowa kluczowe:** egzoszkielety, ergonomia, projektowanie systemu pracy

### 1. WPROWADZENIE

#### 1.1. Analiza literatury

Ostatnie pięćdziesięciolecie przyniosło znaczny postęp w robotyce i automatyzacji. Takiej zawrotnej kariery dla słowa „robot” nie spodziewał się z pewnością jego twórca – Czech Karol Čapek (1921). Od czasu uruchomienia pierwszego seryjnego robota przemysłowego Unimate w fabryce General Motors w Trenton (1960) niemalże codziennie pojawiają się nowe typy robotów i ich zastosowania. Jednym z najnowocześniejszych, ciągle testowanych rozwiązań z tej dziedziny są egzoszkielety. Dzięki egzoszkieletom na naszych oczach ziszczają się marzenia naukow-

---

\* Doktorant Politechniki Poznańskiej, Wydział Inżynierii Zarządzania.

\*\* Student, Uniwersytet Techniczny Braunschweig, Niemcy.

ców o zwiększeniu możliwości organizmu człowieka. Konstrukcja mechaniczno-elektryczna, zakładana przez użytkownika na podobieństwo kombinezonu i mocowana do określonych części ciała, pozwala wzmocnić jego siłę oraz zwiększyć wytrzymałość.

Analizując literaturę przedmiotu związaną z tematyką budowy i zastosowania egzoszkieletów w przemyśle, zauważa się pewną lukę. Wśród pozycji obcojęzycznych znaleziono kilka pozycji głównie w języku angielskim, które ukazały się w ostatnich latach. Należy jednak zaznaczyć, że dorobek naukowy w danej dziedzinie ogranicza się prawie wyłącznie do zbioru artykułów tematycznych. Świadczy o wybiórczym ujęciu tematyki przedmiotu oraz braku usystematyzowanej wiedzy z przedmiotowego zakresu. Niniejsza publikacja stanowi przyczynek do zgłębienia tematu w dziedzinie budowy i eksploatacji egzoszkieletów. Tematyka podejmowanych w pracy zagadnień oraz jej układ uwzględniają wachlarz podstawowych problemów, związanych z zastosowaniem egzoszkieletów w przemyśle motoryzacyjnym.

## 1.2. Geneza i idea egzoszkieletów

Termin egzoszkielet (*exoskeleton*) oznacza szkielet zewnętrzny, w który są wyposażone np. owady. W przeciwieństwie do ludzi, którzy mają szkielet wewnętrzny – endoszkielet (*endoskeleton*). Egzoszkielet u zwierząt pełni różnorakie funkcje: od ochronnej przed drapieżnikami, przez barierę przed odwodnieniem, zapewnienie odżywiania i przewodzenia bodźców zewnętrznych, aż po sztywne podparcie całego organizmu. Osiągnięcie takiej wielofunkcyjności skonstruowanego przez człowieka egzoszkieletu jest na razie marzeniem. Podstawowa funkcja – sztywne podparcie organizmu i jego ładunku, będącego platformą do dalszej rozbudowy, jest już dostępna w praktyce.

Wang i in. (2017, s. 358-365) opisuje egzoszkielety jako „pomocniczą poręczną robotykę”, która ma na celu zastosowanie mechanicznej mocy przez przymocowanie urządzenia do ciała osoby. Looze i in. (2016, s. 671-681) podobnie opisuje egzoszkielety jako „nadającą się do noszenia, zewnętrzną strukturę mechaniczną”, która ma na celu zwiększenie wydajności fizycznej użytkownika. Obaj autorzy charakteryzują egzoszkielety w dwóch kategoriach: aktywne i pasywne.

## 1.3. Podział i rodzaje egzoszkieletów

Egzoszkielety można sklasyfikować na kilka grup (González-Vargas, 2016). Podział ze względu na **przeznaczenie**:

- militarne (np. PowerWalk),
- do celów medycznych w rehabilitacji (np. Lower Body, Mobile Assitive),

- przemysłowe (np. Chairless Chair),
  - dla sportowców (np. Againer).
- Podział ze względu na **rodzaj konstrukcji**:
- egzoszkieleł kończyn dolnych,
  - egzoszkieleł kończyn górnych,
  - egzoszkieleł kompletny,
  - ortezy np. na dłonie (rękawice).
- Podział ze względu na **układ wykonawczy**:
- hydrauliczny,
  - pneumatyczny,
  - elektryczny,
  - kombinacja hydraulicznego/pneumatycznego/elektrycznego (np. HULC).
- Podział ze względu na **rodzaj wspomagania**:
- pasywne: maksymalny poziom wspomagania użytkownika, od którego nie wymaga się żadnego oddziaływania kończynami na urządzenie, ruch odbywa się automatycznie, zgodnie z wprowadzonym programem,
  - aktywne: egzoszkieleł automatycznie wykrywa zamiar ruchu i wspomaga użytkownika w określonym zakresie, w celu wykonania przemieszczenia.
- Podział ze względu na **rodzaj sterowania**:
- przy pomocy sygnałów bioelektrycznych generowanych przez mięśnie,
  - przy pomocy czujników sensorycznych.
- Istnieje kilka rozwiązań konstrukcyjnych egzoszkielełtów uwzględniających liczbę stopni swobody urządzenia w odniesieniu do ciała użytkownika. Liczba stopni swobody egzoszkielełtu nie musi być równa liczbie stopni swobody kończyny. Przykładowo, siła generowana przez urządzenie wykonawcze egzoszkielełtu może być przekazywana na kończynę tylko w jednym punkcie (Williams, 1998). Egzoszkieleł może pracować w przestrzeni roboczej kończyny. Konstrukcja i możliwości ruchowe egzoszkielełtu nie mogą prowadzić do sytuacji, w której kończyna przyjmuje nienaturalną pozycję (przekroczone wartości kątowe w stawie łokciowym).

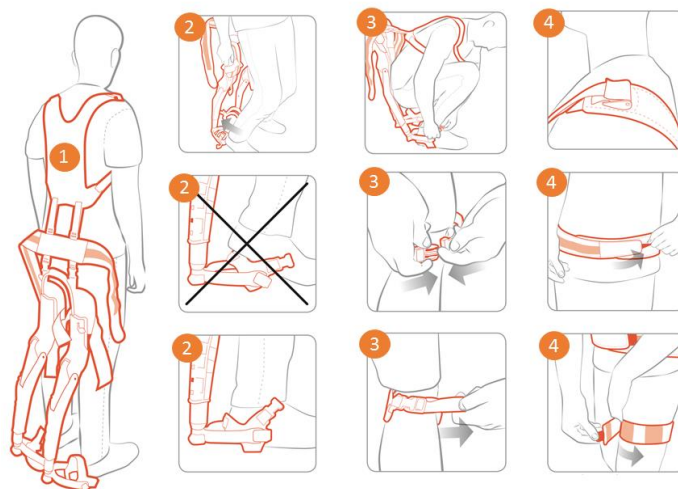
## 2. ZASADA DZIAŁANIA

Egzoszkieleł, by móc efektywnie wspierać przenoszenie ładunków, musi mieć własne „stopy”, które będą podparciem dla niego i użytkownika. Powoduje to przenoszenie ciężaru ładunku bezpośrednio na podłoże, a nie na użytkownika. Egzoszkieleł mocowany jest za pomocą pasów, najczęściej na udach i podudziach, w pasie oraz w wypadku egzoszkielełtów czterokończynowych w barkach, ramionach, przedramionach i dłoniach. Ilość i siła dociągu wymienionych pasów jest określona zarówno przez wagę egzoszkielełtu i użytkownika oraz sposób zamocowania czujników i efektorów.

Jednym z przykładów egzoszkieleatów na odciążenie kręgosłupa oraz kończyn dolnych jest **Chairless Chair**, który przeznaczony jest do pracy na stanowiskach podmontażu oraz na liniach montażowych. Zakres czynności powinien znajdować się w obszarze od wysokości kolan do obszaru klatki piersiowej. Samo zakładanie i zdejmowanie jest bardzo proste, pracownik samodzielnie mocuje szkielet, zakładając w pierwszej kolejności specjalną kamizelkę. Następnie przytwierdza szkielet do butów, po czym zapina pasy do bioder i ud. Dwie powierzchnie podpierają pośladki, a dwa wsporniki z tworzywa wzmocnionego włóknem węglowym dopasowują się do konturu nóg. Połączenie i miejsce zgięcia znajdują się po tylnej stronie kolana. Chairless Chair można w łatwy sposób dopasować do wzrostu człowieka i do pożądanej pozycji, ustawiając na tylnej części podpór odpowiednią długość. Ciężar ciała pracownika przenoszony jest na podłogę przez te elementy.

Na rysunku 1 pokazano cztery etapy zakładania urządzenia na ciało operatora. Przebieg zakładania egzoszkieletu opisano za pomocą punktów:

- punkt 1 – nałożyć kamizelkę jak plecak.
- punkt 2 – wypozycjonować nogi Chairless Chair i wsunąć stopy w urządzenie.
- punkt 3 – klęknąć i zapiąć mocowanie buta, zapiąć ciasno opaskę, to samo powtórzyć dla drugiej nogi.
- punkt 4 – wyregulować kamizelkę, zapiąć pas na wysokości bioder i na udach.



Rys. 1. Etapy zakładania egzoszkieletu Chairless Chair na ciało operatora (materiały szkoleniowe firmy Noonee)

Zdejmowanie szkieletu należy rozpocząć od odpięcia pasa, pasków na udach i mocowania buta. Na końcu należy ściągnąć pas lub kamizelkę (w celu uniknięcia upadku urządzenia na podłogę).

Zasadą dla wszystkich egzoszkieleatów jest to, że po dopasowaniu do konkretnego użytkownika, w tym dobraniu długości poszczególnych elementów nośnych, miejsc i kątów zgięcia oraz położenia czujników, te charakterystyczne punkty nie mogą się przemieszczać. Jakikolwiek bowiem przesunięcie elementów ruchomych egzoszkieleatu w stosunku do poruszającego się ciała użytkownika powodowałoby zmianę wzorców ruchu i poszczególnych pozycji, co wpływałoby negatywnie na wygodę i efektywność egzoszkieleatu, a tym samym zmniejszałoby jego możliwości.

Każdy egzoszkieleat dopasowywany jest indywidualnie do użytkownika. Jest do tego potrzebna odpowiednia wiedza, doświadczenie oraz czas. Trwają prace nad automatyzacją, uproszczeniem i skróceniem tego procesu. Jego przebieg zależy od wielu czynników, takich jak: rodzaj aktywności i obciążenia użytkownika, charakterystyka chodu i wzorców poszczególnych pozycji (stania, siedzenia itp.)

Długotrwałe wykorzystanie egzoszkieleatu powinno być:

- wygodne dla użytkownika,
- możliwe do zniesienia przy długotrwałym obciążeniu i wielokrotnym powtarzaniu (np. bez zbędnych szarpnięć itp.),
- utrzymane w ramach naturalnych (fizjologicznych lub zbliżonych do fizjologicznych) dla niego wzorców ruchu i pozycji.

### **3. EGZOSZKIELETY W BRANŻY SAMOCHODOWEJ, PRZYKŁADY**

Pomimo dużego zainteresowania egzoszkieleatami o przeznaczeniu przemysłowym, ich wdrożenie na dużą skalę w przemyśle jest wciąż znikome. Omówione urządzenia egzoszkieleatowe są w dużej mierze na etapie eksperymentalnym, tylko część z nich jest dostępna w sprzedaży. W wielu firmach produkcyjnych odbywają się testy, ale urządzenia są wprowadzane niechętnie do produkcji seryjnej. Należy najpierw rozwiązać piętzące się problemy techniczne. Nawet proste egzoszkieleaty bierne nie są jeszcze w praktyce szeroko stosowane. Jednym z powodów może być poziom dyskomfortu związanego z jego noszeniem. W kilku badaniach zgłaszano pewne obawy dotyczące tego aspektu (Abdoli-Eramaki, 2008, s. 456-465). Dzięki ustaleniu biomechanicznej przewagi, wyeliminowanie dyskomfortu wynikającego z fizycznego interfejsu użytkownika sterującego urządzeniem, może być kolejnym wyzwaniem w projektowaniu szkieletów zewnętrznych, biorąc pod uwagę, że nawet minimalny dyskomfort może utrudniać adaptację użytkownika. Te ostatnie mogą się różnić od egzoszkieleatów mających na celu wspieranie osób niepełnosprawnych, kiedy to egzoszkieleat może decydować o możliwości chodzenia lub chwytania. Kolejna obawa dotycząca urządzeń biernych to potencjalne zwiększenie

aktywności mięśni nóg. Ten aspekt z pewnością wymaga uwzględnienia w dalszym rozwoju w kierunku produktów gotowych do użycia.

W tabelach 1–6 przedstawiono najnowsze egzoszkielety stosowane w produkcji, które zostały podzielone na pięć grup: odciążające kończyny dolne (tab. 1), górną część ciała (tab. 2), plecy (tab. 3 i 4), dłonie (tab. 5) oraz cały korpus (tab. 6). Wszystkie egzoszkielety zestawione w tabelach były antropomorficzne. Oznacza to, że egzoszkielet ma podobną strukturę szkieletu w porównaniu z ciałem ludzkim obejmującym serię wielu uruchomionych stawów. Główną zaletą jest to, że odcisk stopy egzoszkieletu jest stosunkowo niewielki, ponieważ przylega bezpośrednio do ciała, a ruchy te teoretycznie powinny być nieograniczone. Ruchy są kopiowane przez egzoszkielet, tj. kończyny człowieka i egzoszkielet są wyrównane podczas ruchu. To wymaga wykrycia zamiaru ruchów ludzkich, aby zainicjować odpowiednie reakcje siłowników egzoszkieletu.

Tabela 1. Egzoszkielety odciążające kończyny dolne




|   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
|   | Nazwa egzoszkieletu:      | Charless Chair  |
|   | Firma:                    | Noonee  |
|   | Część ciała:              | kończyny dolne  |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="http://www.noonee.com">http://www.noonee.com</a><br>03.09.2018 |
|  | Nazwa egzoszkieletu:      | Hercule   |
|   | Firma:                    | RB3D  |
|   | Część ciała:              | kończyny dolne  |
|   | Mechanizm zasilania:      | aktywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="https://www.rb3d.com">https://www.rb3d.com</a><br>03.09.2018   |
|  | Nazwa egzoszkieletu:      | legX  |
|   | Firma:                    | SuitX   |
|   | Część ciała:              | kończyny dolne  |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="https://www.suitx.com">https://www.suitx.com</a><br>03.09.2018 |

Tabela 2. Egzoszkielety odciążające górną część ciała



|   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
|    | Nazwa egzozoszkieletu:    | AIRFRAME  |
|   | Firma:                    | Levitate Tech   |
|   | Część ciała:              | kończyny górne  |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="http://www.levitatetech.com">http://www.levitatetech.com</a><br>03.09.2018         |
|    | Nazwa egzozoszkieletu:    | Armor-Man2  |
|   | Firma:                    | Tiltamax (Amazon)   |
|   | Część ciała:              | kończyny górne  |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="https://tilta.com">https://tilta.com</a><br>03.09.2018                             |
|   | Nazwa egzozoszkieletu:    | Ekso Works Vest   |
|   | Firma:                    | Ekso Bionics  |
|   | Część ciała:              | kończyny górne  |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="https://eksobionics.com">https://eksobionics.com</a><br>03.09.2018                 |
|  | Nazwa egzozoszkieletu:    | Exhauss   |
|   | Firma:                    | Exhauss   |
|   | Część ciała:              | kończyny górne  |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="http://www.exhauss.com">http://www.exhauss.com</a><br>03.09.2018                   |
|  | Nazwa egzozoszkieletu:    | shoulderX   |
|   | Firma:                    | SuitX   |
|   | Część ciała:              | kończyny górne  |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="https://www.suitx.com/shoulderx">https://www.suitx.com/shoulderx</a><br>03.09.2018 |
|  | Nazwa egzozoszkieletu:    | Wiely exoskeleton   |
|   | Firma:                    | Wiely   |
|   | Część ciała:              | kończyny górne  |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="https://wiely.en">https://wiely.en</a><br>03.09.2018                               |

Tabela 3. Egzoszkielety odciążające plecy, cz. 1




|   |                      |  |
|---|----------------------|--|
|    | Nazwa egzoszkieletu: | AWN-03   |
|   | Firma:               | ActiveLink   |
|   | Część ciała:         | górną (plecy)  |
|   | Mechanizm zasilania: | aktywny – elektryczny  |
|   | Źródło:              | <a href="http://atoun.co.jp">http://atoun.co.jp</a>                                    |
|   | Data pobrania:       | 03.09.2018   |
|    | Nazwa egzoszkieletu: | backX  |
|   | Firma:               | SuitX  |
|   | Część ciała:         | górną (plecy)  |
|   | Mechanizm zasilania: | pasywny  |
|   | Źródło:              | <a href="https://www.suitx.com">https://www.suitx.com</a>                              |
|   | Data pobrania:       | 03.09.2018   |
|   | Nazwa egzoszkieletu: | FLx ErgoSkeleton   |
|   | Firma:               | StrongArm Tech   |
|   | Część ciała:         | górną (plecy)  |
|   | Mechanizm zasilania: | pasywny  |
|   | Źródło:              | <a href="https://www.strongarmtech.com">https://www.strongarmtech.com</a>              |
|   | Data pobrania:       | 03.09.2018   |
|  | Nazwa egzoszkieletu: | H-WEX  |
|   | Firma:               | Hyundai  |
|   | Część ciała:         | górną (plecy)  |
|   | Mechanizm zasilania: | aktywny – elektryczny  |
|   | Źródło:              | <a href="http://www.hyundai.news/uk/release/827/">www.hyundai.news/uk/release/827/</a> |
|   | Data pobrania:       | 03.09.2018   |
|  | Nazwa egzoszkieletu: | HAL Lumbar Support   |
|   | Firma:               | CYBERDYNE  |
|   | Część ciała:         | górną (plecy)  |
|   | Mechanizm zasilania: | aktywny – elektryczny  |
|   | Źródło:              | <a href="https://www.cyberdyne.jp">https://www.cyberdyne.jp</a>                        |
|   | Data pobrania:       | 03.09.2018   |
|  | Nazwa egzoszkieletu: | Laevo V2   |
|   | Firma:               | Laevo  |
|   | Część ciała:         | górną (plecy)  |
|   | Mechanizm zasilania: | pasywny  |
|   | Źródło:              | <a href="http://en.laevo.nl">http://en.laevo.nl</a>                                    |
|   | Data pobrania:       | 03.09.2018   |



Tabela 4. Egzoszkielety odciążające plecy, cz. 2



|   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
|  | Nazwa egzoszkieletu:      | Muscle Suit   |
|   | Firma:                    | Innophys  |
|   | Część ciała:              | górna (plecy)   |
|   | Mechanizm zasilania:      | aktywny (sprężone powietrze)  |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="https://innophys.jp">https://innophys.jp</a><br>03.09.2018                     |
|  | Nazwa egzoszkieletu:      | V22 EroSkeleton   |
|   | Firma:                    | StrongArm Tech  |
|   | Część ciała:              | górna (plecy)   |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="https://www.strongarmtech.com">https://www.strongarmtech.com</a><br>03.09.2018 |

Tabela 5. Egzoszkielety odciążające cały korpus




|   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
|  | Nazwa egzoszkieletu:      | Ekso Works  |
|   | Firma:                    | Ekso Bionics  |
|   | Część ciała:              | całe ciało  |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="https://eksobionics.com">https://eksobionics.com</a><br>03.09.2018               |
|  | Nazwa egzoszkieletu:      | FORTIS  |
|   | Firma:                    | Lockheed Martin   |
|   | Część ciała:              | całe ciało  |
|   | Mechanizm zasilania:      | pasywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="https://www.lockheedmartin.com">https://www.lockheedmartin.com</a><br>03.09.2018 |

Tabela 6. Egzoszkielec odciążający dłoń

|   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
|  | Nazwa egzoszkieletu:      | SEM Glove   |
|   | Firma:                    | Bioservo  |
|   | Część ciała:              | dłoń  |
|   | Mechanizm zasilania:      | aktywny   |
|   | Źródło:<br>Data pobrania: | <a href="http://bioservo.com/en">http://bioservo.com/en</a><br>03.09.2018 |

Aktywne egzoszkielety mogą mieć większy potencjał zmniejszania obciążeń fizycznych. Pasywne egzoszkielety mają głównie potencjał odciążenia pleców, natomiast aktywne urządzenia mogą odciążać wiele stawów w całym ciele. Jednak wraz ze wzrostem liczby połączeń (każdy z nich wymaga siłowników i zasilania), wzrośnie ciężar egzoszkieletu. Na przykład, egzoszkielec górnej części ciała z lekimi siłownikami, takimi jak PaExo firmy Otto Bock, ma całkowitą wagę 1,8 kg, natomiast aktywne egzoszkielety mogą ważyć nawet powyżej 20 kg.

Rozróżnienie zamierzonych i niezamierzonych ruchów jest często trudne i skutkuje systemami z wieloma różnymi rodzajami czujników i złożonym przetwarzaniem sygnału. Yang i in. (2008, s. 1599-1612) zajęli się koniecznością udoskonalenia strategii kontroli, aby umożliwić płynne ruchy w każdym tempie. Pozostaje wyzwaniem dla twórców antropomorficznych aktywnych szkieletów zewnętrznych, aby odzwierciedlić ludzką anatomię, kinematykę i kinetykę i dzięki temu umożliwić naturalne i wygodne ruchy.

#### **4. OCENA ERGONOMICZNA EGZOSZKIELETÓW W MIEJSCU PRACY**

Pomimo ciągłej tendencji w automatyzacji i mechanizacji w przemyśle, wielu pracowników wciąż jest narażonych na fizyczne obciążenie pracą z powodu obsługi materiałów (ponad 30% ludności), powtarzających się ruchów (63%) i niewygodnych pozycji ciała (46%). Dane te, względnie stabilne w ciągu ostatniej dekady, przyczyniają się do tego, że związane z pracą zaburzenia mięśniowo-szkieletowe (*musculoskeletal disorders* – MSD) nadal dotyczą znacznej liczby pracowników. W Unii Europejskiej co roku ponad 40% pracowników cierpi na bóle krzyża, szyi i ramion (Eurofound, 2012).

Pełna automatyzacja rozwiązuje te problemy, ale nie zawsze jest to wykonalne. Na przykład w dynamicznych środowiskach produkcyjnych lub magazynowych stosunkowo małe rozmiary zamówień narzucają wysoki poziom elastyczności, a w takich przypadkach pełna automatyzacja jest niemożliwa lub zbyt kosztowna. W kontekście stale zmieniających się produktów i zadań nadal wymagana jest ludzka zdolność do obserwowania, decydowania i przyjmowania odpowiednich działań w ciągu kilku sekund. W związku z tym pracownicy są nadal narażeni na różne działania produkcyjne, takie jak montaż lub obsługa materiałów, a zatem są narażeni do związanego z tym ryzyka MSD. Rośnie ruch we współczesnym przemyśle w kierunku współpracy z robotem ludzkim w celu poprawy wykorzystania robotyki przy zachowaniu elastyczności ludzi (MacDougall, 2014). W przypadku zadań związanych z obsługą ręczną jednym rozwiązaniem jest użycie zewnętrznych szkieletów. Główną przewagą zastosowania egzoszkieletu nad jakimkolwiek typem systemu robotycznego (klasycznych robotów, w pełni zautomatyzowanych

systemów lub humanoidalnych robotów) byłoby to, że szczególnie w dynamicznych środowiskach w pełni wykorzystamy ludzką kreatywność i elastyczność.

Przemysłowe wykorzystanie pasywnych i aktywnych szkieletów zewnętrznych wymaga rozważenia kilku konkretnych kwestii bezpieczeństwa. Różne scenariusze ryzyka można zdefiniować dla pracownika noszącego uruchamiany egzoszkielec w polu zawodowym, na przykład na halach produkcyjnych w przemyśle wytwórczym, w magazynach, w szpitalach lub na zewnątrz w rolnictwie lub budownictwie.

Ciekawe naukowo jest również badanie Eisingera, Kumara i Woodrowa (1996, s. 194-197) w odniesieniu do ortezy łędźwiowych – ponieważ stwierdzili oni, że długotrwałe stosowanie ortezy może wiązać się z dekondukcjonowaniem mięśni tułowia. W związku z tym zaleca się ograniczenie czasu ich używania lub połączenie użycia z ćwiczeniami wzmacniającymi. To samo zjawisko i zalecenie może dotyczyć egzoszkielec stosowanych w przemyśle.

Jak zauważono, nie ma bezpośredniego związku między wynikami badań a kompleksową i całościową metodą oceny egzoszkielec w środowisku przemysłowym. Istniejące badania koncentrują się niemal wyłącznie na różnych wpływach na określone części ludzkiego ciała, ale nie mają na celu przedstawienia wyników w uproszczonym „wyniku oceny” odpowiednim do wymagań przemysłowych, które pokazują wpływ na indywidualną ocenę miejsca pracy. Ponadto badania te są bardzo złożone, co wymaga ogromnych nakładów finansowych i czasu na uzyskanie nowych wyników. Będąc tak skomplikowanymi, wyniki są często zbyt szczegółowe, aby przeznaczyć je do dalszych zastosowań, np. innych egzoszkielec w innym miejscu pracy. Zaspokojenie zapotrzebowania przemysłu na stosowanie metod w szybki i prosty sposób do oceny różnych warunków, szczególnie w przypadku egzoszkielec jest sprzeczne ze złożonością ludzkiego ciała i wynikającymi z niego wpływami. Jednak istnieje potrzeba przedstawienia wszystkich wpływów w wyjątkowy i jasny sposób. Istnieje krytyczna rozbieżność między potrzebą wystarczającej dokładności, a także odpowiedzialności i oceny skomplikowanych systemów pracy bez dużego wysiłku. W celu sprostania temu wyzwaniu zaprojektowano wiele naukowych i wystandardyzowanych metod oceny. Niektóre duże firmy opracowały nawet własne systemy oceny miejsc pracy, chociaż większość z nich nadal opiera się na tych standardowych metodach.

Looze i in. (2016, s. 671-681) donoszą, że 18 z 40 recenzowanych artykułów zostało opublikowanych po 2009 r. Duże zainteresowanie egzoszkieleciami do zastosowań przemysłowych w ostatnim czasie potwierdza teorię, że będzie rosła zapotrzebowanie na nowe ergonomiczne metody oceny miejsca pracy lub modyfikacje obecnie istniejących. Chociaż niektóre badania wykazują potencjalne wady egzoszkielec, można założyć, że zalety mogą przeważać nad wadami (ibidem).

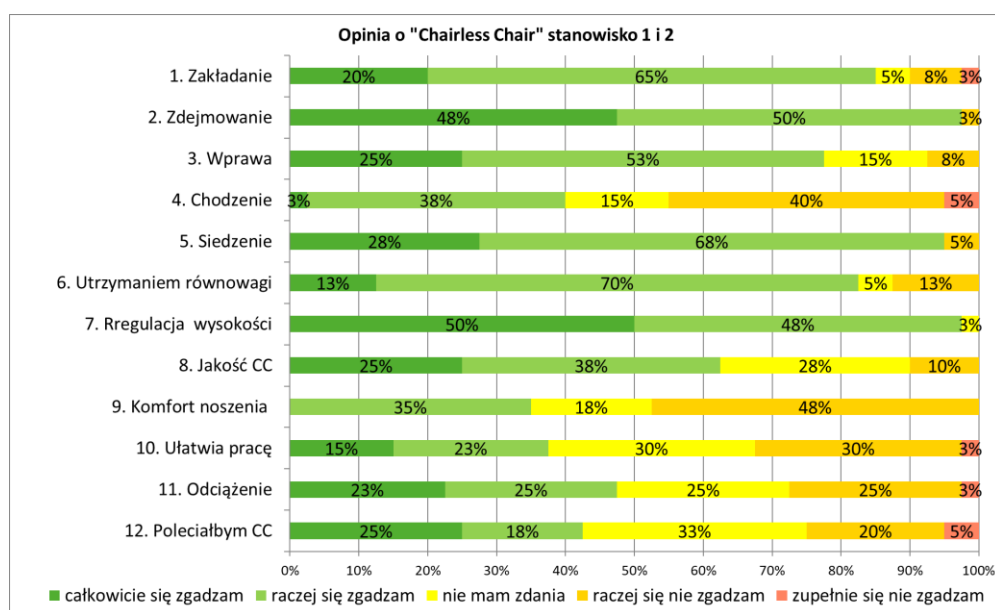
W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki badań własnych przeprowadzonych w dużym przedsiębiorstwie produkującym samochody dostawcze. Podstawowym celem badania było poznanie opinii pracowników, czy chcieliby, aby zakład zakupił urządzenie Chairless Chair (egzoszkielec na kończyny dolne). Ba-

danie obejmowało 4 tygodnie testów z urządzeniem, w którym brało udział 8 pracowników.

Każdy z pracowników wypełniał codziennie ankietę, która obejmowała 12 następujących pytań:

1. Zakładanie Chairless Chair uważam za łatwe.
2. Zdejmowanie Chairless Chair uważam za łatwe.
3. Czynności zakładania i zdejmowania wykonuję z coraz większą wprawą.
4. Chairless Chair nie przeszkadza mi przy chodzeniu.
5. Siedzenie z Chairless Chair uważam za wygodne.
6. Używając Chairless Chair, nie mam problemu z utrzymaniem równowagi.
7. Mogę łatwo regulować ustawienie wysokości.
8. Jestem zadowolony z jakości Chairless Chair.
9. Komfort noszenia uważam za wysoki.
10. Chairless Chair ułatwia mi pracę.
11. Dzięki korzystaniu z Chairless Chair czuję się odciążony.
12. Polecałbym Chairless Chair także innym pracownikom.

Pracownicy mogli ocenić każde pytanie w skali od 1 do 5, gdzie 1 oznacza, że pracownik całkowicie zgadza się z twierdzeniem, 5 – że pracownik zupełnie nie podziela tego zdania. Wyniki badań ankietowych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wyniki ankiety dotyczącej pracy z Chairles Chair  
(Źródło: badania własne)

Z rysunku 2 widać, że zarówno na pytanie dotyczące chodzenia (pytanie 4), jak i komfortu pracy (pytanie 9) pracownicy odpowiadali negatywnie. Pracownicy niechętnie chcieliby pracować w tym urządzeniu i nie będą polecać tego rozwiązania (pytanie 12). Siedzenie w urządzeniu uważali za wygodne (pytanie 5). Zakładanie (pytanie 1) i zdejmowanie szkieletu (pytanie 2) nie sprawiało również większych problemów.

## 5. PODSUMOWANIE

Badania nad egzoszkieletemi skupiają się obecnie na pięciu zasadniczych problemach: elementach i materiałach konstrukcyjnych, energooszczędności, sterowaniu, uruchamianiu (zwanym również uzbrajaniem egzoszkieletem), biomechanice użytkownika. Spodziewany postęp w tych dziedzinach pozwoli lepiej zrozumieć złożoną interakcję człowiek–egzoszkielet w różnych warunkach działania. Przegląd literatury wykazuje szerokie zainteresowanie pasywnymi i aktywnymi egzoszkieletemi do celów przemysłowych, ale większość opracowań znajduje się na wczesnym etapie rozwoju technologii, a wiele koncepcji nie jest testowanych poza laboratorium.

Pasywne egzoszkielety przemysłowe mają na celu podtrzymywanie lub rozładowywanie napięcia mięśni, wydają się być w tym przypadku bardzo udanym rozwiązaniem zarówno dla dynamicznego podnoszenia, jak i trzymania statycznego. Podnoszono w badaniach pewne obawy dotyczące potencjalnie negatywnych skutków związanych ze wzrostem aktywności mięśni nóg, wysokim poziomem dyskomfortu i dekoncentracji mięśni.

Obecnie każda kombinacja miejsca pracy i egzoszkieletemu musi być analizowana indywidualnie, aby określić wpływ egzoszkieletemu na ocenę miejsca pracy (Theurel, 2018). Takie podejście jest czasochłonne, niepraktyczne, a zatem wysoce kosztowne w środowisku przemysłowym. Zgodnie z wynikami Weston i in. (Weston, 2018) proponuje się zatem całościowe podejście systemowe, które może być podstawą do opracowania nowej i ogólnej ergonomicznej metody oceny ryzyka, która może być rozwiązaniem dla wyżej wspomnianej sytuacji.

Potencjalny wpływ na zmniejszenie obciążeń fizycznych wydaje się nawet wyższy dla aktywnych egzoszkieletemów. Zarówno niższe jak i górne części ciała mogą odnieść korzyści z dużego zmniejszenia obciążenia.

Egzoszkielety mają zatem potencjał, by znacznie zmniejszyć wpływ czynników leżących u podstaw rozwoju urazów mięśniowo-szkieletowych związanych z pracą. Jednak należy jeszcze określić faktyczny wpływ na potencjalnie zmniejszającą się liczbę urazów, ponieważ do tej pory znaczące wyzwania techniczne i brak konkretnych norm bezpieczeństwa utrudniają wdrażanie ich na dużą skalę w miejscach pracy.

**LITERATURA**

- Abdoli-Eramaki, M., Agnew, M.J., Stevenson, J.M. (2006). An On-body Personal Lift Augmentation Device (PLAD) Reduces EMG Amplitude of Erector Spinae during Lifting Tasks. *Clinical Biomechanics*, 21 (5), 456-465.
- Abdoli-Eramaki, M., Stevenson, J.M. (2008). The Effect of On-body Lift Assistive Device on the Lumbar 3D Dynamic Moments and EMG during Asymmetric Freestyle Lifting. *Clinical Biomechanics*, 23, 372-380.
- De Looze, M.P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K.S., O'Sullivan, L.W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59(5), 671-681.
- Deng, M.J., Wang, Z., Fie, F.I. F.I., Xue, Y. (2013). Design and Weight Lifting Analysis of a Strengthened Upper Limb Exoskeleton Robot. *Applied Mechanics and Materials*, 437, 695-699.
- Eisinger, D.B., Kumar, R., Woodrow, R. (1996). Effect of Lumbar Orthotics on Trunk Muscle Strength. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 75 (3), 194-197.
- Eurofound (2012). *Fifth European Working Conditions Survey, Publications Office of the European Union*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- González-Vargas, J., Ibáñez, J., Contreras-Vidal, J.L., van der Kooij, H., Pons, J.L. (2016). *Wearable Robotics: Challenges and Trends: Proceedings of the 2nd International Symposium on Wearable Robotics, WeRob (2016)*. October 18-21, 2016, Segovia, Spain (Biosystems & Biorobotics). Springer.
- Kim, W.S., Lee, H.D., Lim, D.H., Han, C.S. (2013). *Development of a Lower Extremity Exoskeleton System for Walking Assistance While Load Carrying*. Proceedings of the Sixteenth International Conference on Climbing and Walking Robots, Sydney, Australia, July 14-17, 35-42.
- Lee, H., Kim, W., Han, J., Han, C. (2012). The Technical Trend of the Exoskeleton Robot System for Human Power Assistance. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13 (8), 1491-1497.
- Lee, H., Lee, B., Kim, W., Gil, M., Han, J., Han, C. (2012). Human-robot Cooperative Control Based on PHRI (Physical Human-robot Interaction) of Exoskeleton Robot for a Human Upper Extremity. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13 (6), 985-992.
- MacDougall, W. (2014). *INDUSTRIE 4.0 Smart Manufacturing for the Future*. Berlin: Germany Trade & Invest.
- Muramatsu, Y., Kobayashi, H., Sato, Y., Jiaou, H., Hashimoto, T., Kobayashi, H. (2011). Quantitative Performance Analysis of Exoskeleton Augmenting Devices-muscle Suit for Manual Worker. *International Journal of Automation Technology*, 5 (4), 559-567.
- Theurel, J., Desbrosses, K., Roux, T., Savescu, A. (2018). Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*, 67, 211-217.
- Toyama, S., Yamamoto, G. (2010). Wearable Agrirobot, *Journal of Vibro-Engineering*, 12(3), 287-291.

- Tsuzura, M., Nakakuki, T., Misaki, D. (2013). A Mechanism Design of Waist Power Assist Suit for a Caregiver by Using Torsion Springs. *In Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2013 13th International Conference, 866-868. Gwangju: IEEE.
- Viteckova, S., Kutilek, P., Jirina, M. (2013). Wearable Lower Limb Robotics. *A Review Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 33 (2), 96-105.
- Wang, C., Ikuma, L., Hondzinski, J., de Queiroz (2017). Application of Assistive Wearable Robotics to Alleviate Construction Workforce Shortage: Challenges and Opportunities. *Computing in civil engineering 2017: Information modeling and data analytics*, 358-365.
- Weston, E.B., Alizadeh, M., Knapik, G.G., Wang, X., Marras, W.S. (2018). Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Applied Ergonomics*, 68, 101-108.
- Whitfield, B.H., Costigan, P.A., Stevenson, J.M., Smallman, C.L. (2014). Effect of an On-body Ergonomic Aid on Oxygen Consumption during a Repetitive Lifting Task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44 (1), 39-44.
- Williams II, R.L. (1998). Kinesthetic force/moment feedback via active exoskeleton. *Proceedings of the IMAGE Conference*, Scottsdale, Arizona.
- Yang, C.J., Zhang, J.F., Chen, Y., Dong, Y.M., Zhang, Y. (2008). A Review of Exoskeleton-type Systems and Their Key Technologies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 (8), 1599-1612.

## EXOSKELETTONS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

### Summary

Exoskeletons are becoming more and more interesting for the industry to support workers in an ergonomic way and further to increase the possibilities in the production system. Today, the most difficult challenge is to constantly detect, construct and evaluate all the effects of an exoskeleton. Ergonomic assessment is in particular one of the main challenges associated with the integration of external skeletons in industry to assess all relevant impacts. The purpose of this report is to present currently available exoskeletons offered for the automotive industry. The article shows what problems and challenges constructors and users have to face and in which direction the development of these products is heading.

**Keywords:** exoskeletons, ergonomics, design of work system

