

country's actions with the framework documents of the European Union. The role of artificial intelligence-based technologies is growing, which allow for more accurate forecasting of demand and supply, optimizing the operation of networks and increasing the flexibility of the energy system.

References

1. Trusina, I., & Jermolajeva, E. (2024). Assessing the sustainability of advanced and developing countries: a different perspective. *Business, Management and Economics Engineering*, 22(1), 96–111
2. Trusina, I., Jermolajeva, E., & Sloka, B. (2022). Analysis of energy resources' flows as the sustainable development parameters. In *Proceedings of the 2022 International Scientific Conference "Economic Science for Rural Development"*, 56, (pp. 254–263).

UKD 681.5

Oleh Marushchak

Politechnika Wroclawska, Polska

PERSPEKTYWNE ROZWÓJ I KIERUNKI WYKORZYSTANIA EGZOSZKIELETÓW

Adnotacja. *Postęp ludzkości w wykorzystaniu technologii cyfrowych i materiałów kompozytowych stwarza warunki do seryjnego rozwoju egzoszkieleτών. Produkcja części z wykorzystaniem druku 3D otwiera nowe możliwości w dziedzinie bioinżynierii, medycyny, hydrauliki, elektrotechniki, automatyki, robotyki i obronności, aby wzmocnić lub przywrócić sprawność ludzkiego układu mięśniowo-szkieleтового. Nowoczesne technologie komputerowe i energetyczne w połączeniu ze sztuczną inteligencją umożliwiają rozwój w kierunku tworzenia egzoszkieleτών, umożliwiających pełną odbudowę i rehabilitację kończyn po ich uszkodzeniu. Zastosowanie najnowszych technologii pozwoli na wykorzystanie egzoszkieleτών w medycynie w celu przywrócenia sprawności układu mięśniowo-szkieleтового.*

Słowa kluczowe: egzoszkieleć, bioinżynieria, robotyka, rehabilitacja

Oleh Marushchak

Wroclaw University of Science and Technology, Poland

PROSPECTIVE DEVELOPMENTS AND DIRECTIONS OF USE OF EXOSKELETON

Pomimo wprowadzenia do praktyki medycznej nowych rozwiązań w zakresie biomechaniki, endoprotetyki i osteosyntezy metalowej, kwestia opracowania praktycznych i niedrogich, zmechanizowanych urządzeń zewnętrznych do regeneracji i wzmacniania układu mięśniowo-szkieleтового pozostaje aktualna oraz obiecująca pod względem wdrożeniowym [3].

Rozwój technologii cyfrowych, możliwość wykorzystania materiałów kompozytowych oraz wytwarzania elementów z zastosowaniem druku 3D otwierają nowe perspektywy w dziedzinach bioinżynierii, medycyny, hydrauliki, elektrotechniki, automatyki, robotyki i obronności – szczególnie w kontekście wzmacniania i regeneracji ludzkiego układu mięśniowo-szkieleтового.

Pośród urządzeń mechanicznych służących do wzmacniania lub regeneracji układu mięśniowo-szkieleowego wiodącą rolę mogą odgrywać robotyczne systemy egzoszkieleτών, które – ze względu na zasadę działania – można podzielić na mechaniczne, hydrauliczne oraz elektryczne. Nowoczesne technologie komputerowe i energetyczne, w połączeniu ze sztuczną inteligencją, umożliwiają rozwój egzoszkieleτών przeznaczonych do pełnego przywracania sprawności i rehabilitacji ruchomości kończyn po ich uszkodzeniu.

Niemniej jednak pełnowymiarowe badania i prototypy egzoszkieleτών umożliwiających pełną wymianę układu mięśniowo-szkieleowego lub rehabilitację w przypadku częściowego paraliżu ciała są obecnie rzadko stosowane w praktyce medycznej z uwagi na następujące czynniki:

- brak długoterminowych źródeł zasilania,

- duży ciężar i objętość istniejących konstrukcji,
- brak możliwości uniwersalnej lub adaptacyjnej produkcji seryjnej,
- konieczność indywidualnego projektowania i wykonania egzoszkieletu, co znacząco podnosi jego koszt.

Egzoszkieleł, w przeciwieństwie do zaprogramowanego robota, jest rzeczywistym zewnętrznym urządzeniem wspomagającym, które musi zapewniać funkcjonowanie ciała lub jego części zgodnie z parametrami ustalonymi przez użytkownika w określonym czasie [1]. Oznacza to, że egzoszkieleł należy rozumieć jako zewnętrzne urządzenie elektromechaniczne, które wykonuje za człowieka lub wzmacnia jego ruchy biologiczne.

Współczesny rozwój technologiczny w zakresie mikrosensorów i mikroprocesorów umożliwia nie tylko wykonywanie operacji mechanicznych, lecz także analizę impulsów elektrycznych skóry, pomiar zmian napięcia mięśniowego i innych parametrów w czasie rzeczywistym [4]. Dzięki temu egzoszkieleł może w praktyce odzwierciedlać i naśladować ruchy człowieka, stając się niezwykle złożonym systemem dynamicznym. W połączeniu z technologiami sztucznej inteligencji zdolnymi do uczenia się system taki jest w stanie reagować na zmiany parametrów w ułamkach sekundy.

Należy podkreślić, że systemy robotyczne mają ogromny wpływ na wszystkie aspekty życia człowieka, w szczególności na rozwój medycyny w zakresie procedur podtrzymywania życia i rehabilitacji fizycznej. Nowoczesne urządzenia biomechaniczne są już w stanie zastępować pojedyncze narządy i kończyny, przywracając pacjentom sprawność fizyczną. Dlatego rozwój i wdrażanie egzoszkielełów w praktyce medycznej stanowi obiecujący kierunek w zakresie kompensacji ograniczeń ludzkiego ciała, jego defektów fizycznych oraz urazów mechanicznych [2].

Tworzenie w pełni lub częściowo zrobotyzowanych urządzeń mobilnych, w połączeniu z rozwiązaniami technologicznymi z różnych dziedzin nauki i techniki, otwiera nowe możliwości w rehabilitacji osób z unieruchomionymi lub poważnie uszkodzonymi kończynami, a także w leczeniu i profilaktyce chorób układu mięśniowo-szkieletowego. Warto również zauważyć, że rozwój lekkich i praktycznych technologii egzoszkielełów jest przedmiotem zainteresowania nie tylko firm prywatnych, ośrodków medycznych i pacjentów, ale także agencji rządowych oraz instytucji obronnych.

Posiadanie tego typu technologii może przyczynić się do zwiększenia zdolności bojowych żołnierzy oraz jednostek sił zbrojnych dowolnego państwa. Choć obecnie prowadzone są intensywne prace nad systemami egzoszkielełów, nie zostały one jeszcze wdrożone do masowej produkcji. Dlatego opracowanie wielofunkcyjnego egzoszkieletu stanowi istotny i perspektywiczny kierunek badawczo-inwestycyjny o znacznym potencjale ekonomicznym, medycznym i obronnym.

Lista wykorzystanych źródeł

1. Денисюк В.О. Аналіз ринку екзоскелетів. *Електронне фахове видання «Ефективна економіка»*. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.6.9> (accessed 22 September 2025).
2. Попадюха Ю. А. Реабілітаційні екзоскелети – сучасність і перспективи застосування. *Молодіжний науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Фізичне виховання і спорт*. 2016. Вип. 24. С. 67-90. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mnv_2016_24_14 (accessed 10 August 2025).
3. Скуратовський Р.В., Сулима О.М., Осадчий Є.О. Біомеханіка екзоскелетона і його застосування в процесі реабілітації. Веб-сайт ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМНУ» URL: https://traumatology.net.ua/?page_id=1779 (accessed 12 August 2025).
4. Flor-Unda O., Arcos-Reina R., Toapanta C., Villao F., Bustos-Estrella A., Suntaxi C., Palacios-Cabrera H. (2025). Challenges in the Development of Exoskeletons for People with Disabilities. no 13(7). DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies13070291> (accessed 20 September 2025).