

УДК 911:504.61

DOI <https://doi.org/10.32782/health-2025.1.20>

ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ФІЗИЧНІЙ ТЕРАПІЇ: ВПЛИВ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ НА РЕАБІЛІТАЦІЮ ПІСЛЯ ТРАВМ ОПОРНО-РУХОВОГО АПАРАТУ

Дуб Мар'яна Михайлівна,

кандидат наук з фізичного виховання та спорту, доцент,

доцент кафедри наук про здоров'я

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

ORCID: 0000-0002-2737-960X

Гнатюк Віталій Васильович,

кандидат біологічних наук, доцент,

доцент кафедри біології, здоров'я людини та фізичної реабілітації,

Бердянський державний педагогічний університет

ORCID: 0000-0001-7475-0670

Расторгуєва Ірина Сергіївна,

старший викладач кафедри біології, здоров'я людини та фізичної реабілітації,

Бердянський державний педагогічний університет

ORCID: 0000-0002-1867-9889

Досягнення в робототехніці та штучному інтелекті відкрили нові перспективи для моторної реабілітації, вселяючи надію на більш ефективне та персоналізоване лікування. Роботизовані системи, від екзоскелетів до допоміжних тренувальних пристроїв на основі кінцевих ефектів, забезпечують безпрецедентний рівень точності, повторюваності й адаптивності в традиційній терапії та обіцяють значні покращення, а також забезпечують сенсорний і моторний зворотний зв'язок. Вони дають змогу проводити контрольовані та персоналізовані терапевтичні вправи, адаптовані до прогресу та потреб кожного пацієнта, що сприяє більш ефективному індивідуальному одужанню. Роботизовані системи також відіграють ключову роль у наданні візуального, слухового та тактильного зворотного зв'язку пацієнтам. У статті розглядається вплив інноваційних технологій, зокрема роботизованих систем, на ефективність фізичної терапії та реабілітації пацієнтів після травм опорно-рухового апарату. Досліджено сучасні підходи до використання екзоскелетів, роботизованих рук, персональних помічників та інтерфейсів «мозок – комп'ютер» у моторній реабілітації верхніх і нижніх кінцівок. Проаналізовано переваги таких технологій, включно з їхньою здатністю забезпечувати точність рухів, індивідуальний підхід та інтерактивний зворотний зв'язок, а також ідентифіковано бар'єри їх упровадження, серед яких висока вартість, необхідність навчання персоналу та обмежений доступ до обладнання. У статті наведено рекомендації щодо оптимізації використання роботизованих систем у фізичній терапії з метою покращення результатів лікування, скорочення тривалості реабілітації та підвищення якості життя пацієнтів. Важливим аспектом є продовження досліджень, спрямованих на вдосконалення роботизованих систем, розробку стратегій їх ефективного застосування та підвищення доступності для різних груп населення. Успішне виконання цих завдань відкриє шлях до трансформації підходів у моторній реабілітації, значно покращить результати лікування, сприятиме соціальній інтеграції людей з порушеннями рухових функцій і підвищить якість їхнього життя.

Ключові слова: роботизовані технології, реабілітація, фізичні порушення, екзоскелет, травма, рухові навички, інноваційні технології.

Mariana Dub, Vitaliy Hnatyuk, Iryna Rastorguyeva. The use of innovative technologies in physical therapy: the impact of robotic systems on rehabilitation after injuries of the musculoskeletal system

Advances in robotics and artificial intelligence have opened up new perspectives for motor rehabilitation, giving hope for more effective and personalized treatment. Robotic systems, from exoskeletons to end-effector-assisted training devices, provide unprecedented levels of precision, repeatability, and adaptability in traditional therapy, promise significant improvements, and provide sensory and motor feedback. They play a crucial role in providing visual, auditory and tactile feedback to patients. More importantly, they allow for controlled and personalized therapeutic exercises adapted to the progress and needs of each patient. This contributes to a more effective individual recovery. The article examines the influence of innovative technologies, in particular robotic systems, on the effectiveness of physical therapy and rehabilitation of patients after injuries to the musculoskeletal system. Modern approaches to the use of exoskeletons, robotic hands, personal assistants, and brain-computer interfaces in motor rehabilitation of upper and lower limbs were studied. The advantages of such technologies are analyzed, including their ability to provide precision movements,

individual approach and interactive feedback, and barriers to their implementation are identified, including high cost, the need for staff training, and limited access to equipment. The article provides recommendations for optimizing the use of robotic systems in physical therapy in order to improve treatment results, reduce the duration of rehabilitation, and improve the quality of life of patients. An important aspect is the continuation of research aimed at improving robotic systems, developing strategies for their effective use, and increasing accessibility for various population groups. The successful solution of these tasks will open the way to the transformation of approaches in motor rehabilitation, significantly improve the results of treatment, contribute to the social integration of people with impaired motor functions and increase their quality of life.

Key words: *robotic technologies, rehabilitation, physical disabilities, exoskeleton, trauma, motor skills, innovative technologies.*

Вступ. Травми опорно-рухового апарату є однією з головних причин втрати працездатності та погіршення якості життя мільйонів людей у світі [1; 2]. Процес реабілітації після таких травм часто є тривалим, вимагає значних зусиль як від пацієнта, так і від медичних працівників, і не завжди забезпечує повне відновлення функцій. Традиційні методи фізичної терапії мають свої обмеження, зокрема залежність від людського фактору, неможливість забезпечення високої інтенсивності занять для всіх пацієнтів, а також труднощі у відстеженні прогресу та адаптації терапії до індивідуальних потреб [3].

У відповідь на ці виклики в останні десятиліття значного розвитку зазнали інноваційні технології, зокрема роботизовані системи, які активно впроваджуються у фізичну терапію. Водночас їх широке застосування супроводжується низкою проблем: високою вартістю обладнання, обмеженою доступністю в менш розвинених регіонах, необхідністю спеціалізованого навчання персоналу та недостатньою кількістю клінічних досліджень, які б підтверджували їх ефективність порівняно з традиційними методами [4]. Так, виникає необхідність систематично проаналізувати вплив роботизованих систем на ефективність реабілітації після травм опорно-рухового апарату.

Мета дослідження – проаналізувати вплив роботизованих систем на ефективність реабілітації пацієнтів після травм опорно-рухового апарату.

Завдання дослідження – визначити переваги та недоліки роботизованих систем у фізичній терапії, оцінити їх ефективність у відновленні моторних функцій, дослідити бар'єри впровадження та розробити рекомендації щодо оптимізації використання цих технологій у медичній практиці.

Методи дослідження. Проведено лінгвостатистичний аналіз літератури в наукометричних базах даних, включно з PubMed, IEE та Web of Science, щодо використання роботизованих технологій у сфері реабілітації людей після травм опорно-рухового апарату. Стратегія пошуку використовувала комбінацію ключових слів, як-от

роботизовані технології, реабілітація, фізичні вади та екзоскелети, травма, рухові навички, інноваційні технології. Так, у літературі виявлено понад 100 статей, присвячених цій темі. У цій статті не наведено перелік усіх знайдених статей, оскільки після застосування критеріїв відбору відсоток статей, дібраних для аналізу, становив менш ніж 10 %, і вони вказані в списку бібліографічних посилань.

Результати дослідження. Перший етап розробки нового реабілітаційного пристрою полягає у визначенні широких можливостей пацієнта (детально аналізуються його рухові навички, установки, очікування, готовність до співпраці, інтереси, схильності тощо) [2; 5]. Цей тип підходу разом із поточними можливостями пацієнта можна графічно порівняти з діагностичним етапом, з особливим акцентом на здорових частинах тіла – визначення можливості аналізу, використання здорової кінцівки та її участі та використання в комплексній реабілітації. процесу, включно з підтримкою діапазону рухів ушкодженої кінцівки [6]. Варто підкреслити, що це не лише спроба розробити основу для вправлення хворої кінцівки за допомогою здорової кінцівки, а й спроба розробити основу у вигляді різних здорових компонентів та особливостей пацієнта, щоб надалі базувати на них можливість одужання. Перший етап не обмежується тільки діагностикою в контексті індивідуальних рухових навичок здорових частин тіла пацієнта. Це також стосується людей похилого віку, які мають менший діапазон рухів, ніж це передбачено в антропометричних атласах [2; 7]. Він має значно ширший спектр дії з погляду всього організму – здорової частини тіла, яка відіграє важливу роль у процесі реабілітації ураженої частини тіла пацієнта. На другому етапі завдання відбувається визначення потреб для задоволення очікувань щодо підтримки реабілітації пошкодженої частини тіла від розробленої концепції з погляду конструкційних рішень, дизайну, апаратної та програмної частин. Можливість проведення діагностики, різних типів вправ (включно з активними, пасивними та впра-

вами з обтяженнями) у поєднанні з біологічним зворотним зв'язком та звітуванням про результати створить ідеальну основу для забезпечення ефективної реабілітації з використанням інноваційних пристроїв [5]. Подібні аспекти досліджень розглядають такі аспекти, як конструкція, апаратна та програмна частини роботизованих систем. У випадку третього етапу реабілітації йдеться не лише про впровадження нових рішень, пов'язаних із біологічним зворотним зв'язком. Принцип базується на реалізації розробки концепції вправ дзеркального відображення та можливість використання додаткових рішень, що підтримують цей тип реабілітації, зокрема робиться акцент на здорових модулях тіла пацієнта [8]. Ця частина проекту є цілком свідомим поєднанням двох попередніх етапів реабілітації. Водночас можна дозувати рівень, на якому травмована кінцівка повинна надавати допомогу іншій, здоровій кінцівці.

Оскільки фізична терапія та реабілітація розвиваються, використання нових технологій, як-от роботи, допомагає добре лікувати людей із травмами м'язів і кісток [2]. Робототехнічні системи поєднують складні технології у сфері приладів і систем керування, що дає змогу виконувати або допомагати пацієнтам у терапевтичних маневрах. Їх головною особливістю є зворотний зв'язок у режимі реального часу та адаптивні механізми контролю, які дають змогу адаптувати процес реабілітації до індивідуальних потреб пацієнта. Інтерактивний зворотний зв'язок і налаштування рівнів складності відіграють важливу роль у посиленні мотивації пацієнтів брати участь у програмах терапії [2; 9]. Надзвичайну зону в роботах населяють екзоскелети та біонічні протези. Ці пристрої є високотехнологічними конструкціями, які носять на тілі. Вони оснащені приводами, датчиками та інтегрованими системами керування. Основне призначення роботизованих пристроїв полягає в тому, щоб допомогти, покращити або відновити пересування в осіб, які страждають від захворювань опорно-рухового апарату [7]. Екзоскелети забезпечують фізичне зміцнення, збільшують м'язову енергію та пришвидшують фізичне тренування, що відіграє ключову роль у процесі одужання людей, уражених неврологічними або скелетними захворюваннями. В академічному середовищі є докази того, що люди, які отримують підтримку від механічних пристроїв, демонструють помітне зменшення тривалості відновлення, якщо порівнювати його зі звичайними тактиками відновлення. Але одна велика

проблема полягає в тому, що ці системи дорогі та потрібно підготовлений персонал для їх обслуговування. Крім того, кожному пацієнту потрібен власний особливий план лікування [10].

Роботизовані технології, що застосовуються в моторній реабілітації, демонструють значну різноманітність, забезпечуючи підтримку та відновлення рухової функції в пацієнтів із травмами, неврологічними захворюваннями або іншими порушеннями. До таких технологій належать екзоскелети, роботизовані руки, системи персональних помічників і навіть інноваційні інтерфейси «мозок – комп'ютер», які створюють нові можливості для терапії. Роботизовані пристрої для верхніх кінцівок спрямовані на поліпшення рухомої функції рук і кистей. Вони надають контрольовані вправи на повторення, що особливо підходить для пацієнтів, які відновлюються від інсульту або інших уражень. До таких пристроїв можна зарахувати роботизовані руки InMotion, екзоскелети ARMin, а також рукавички Handsome [2]. У реабілітації ходьби використовують роботизовані пристрої, які несуть вагу тіла пацієнта та маневрують ногами у спосіб, що нагадує природну ходьбу. Це має велике значення в короткостроковій перспективі для пацієнтів із ходьбою. Системи Lokomat та екзоскелети ReWalk, які ввели ці зміни, значно підвищили результативність фізичної терапії [2,6].

У таблиці 1 представлено результати досліджень щодо реабілітації пацієнтів після травм з використанням системи Locomat.

Ця таблиця демонструє зміни основних параметрів ходьби в пацієнтів із різними діагнозами після проходження курсу реабілітації з використанням роботизованої системи Lokomat. Зазначені параметри містять тривалість ходьби, подолану відстань, швидкість, рівень підтримки та загальну кількість тренувань. Пацієнти з травмою спинного мозку та черепно-мозковою травмою проходили реабілітацію за допомогою системи Lokomat.

Після курсу тренувань усі пацієнти почали ходити довше за часом і долали більшу відстань за один сеанс.

При травмі спинного мозку типу AIS C тривалість ходьби зросла із 16,7 до 24 хвилин, а відстань – із 423 до 758 метрів. При травмі типу AIS D ці показники також покращилися – з 19,1 до 22 хвилин і з 536 до 700 метрів.

Пацієнти із черепно-мозковою травмою теж показали прогрес: ходили довше (з 15,4 до 21 хвилини) та проходили більше (з 350 до 623 метрів).

Таблиця 1

Параметри тренування на початку та в кінці періоду реабілітації з використанням системи Lokomat

Тип травми	Тривалість ходьби за сеанс (хв)		Пройдена відстань за сеанс (м)		Середня швидкість ходьби (км/год)		Сила підтримки (%)		Кількість тренувань	Статистична значущість, Р	
	На початку	В кінці	На початку	В кінці	На початку	В кінці	На початку	В кінці			
Травма спинного мозку AIS C	16.7	24	423	758	1.65	1.88	98	84	20	0.005	
Травма спинного мозку AIS D	19.1	22	536	700	1.55	1.55	98	92	30	0.001	
Черепно-мозкова травма	15.4	21	350	623	1.14	1.36	85	79	25	0.004	

Джерело: проаналізовано та систематизовано згідно з [11].

Швидкість ходьби трохи зросла. Наприклад, при AIS C вона збільшилася з 1,65 до 1,88 км/год, а при черепно-мозковій травмі – з 1,14 до 1,36 км/год.

Сила підтримки знизилася, тобто пацієнти стали менш залежними від допомоги системи.

Кількість тренувань у різних групах становила від 20 до 30.

Статистична значущість показників (Р-значення) свідчить, що зміни є достовірними.

Кілька типів роботів виготовлені спеціально для виконання домашніх завдань, як-от допомога під час прийому їжі, одягання або маніпуляції речами. З таких систем можна згадати персонального помічника PR2 й роботизовану руку JACO. Ці технології надають можливість пацієнтам з руховими обмеженнями значно покращити своє життя в якості та незалежності. Для покращення соціальних навичок та емоційного стану пацієнтів застосовують роботи на кшталт NAO і Pepper та терапевтичний робот PARO. Вони позитивно впливають на людей, які мають захворювання, як-от аутизм або нейродегенеративні захворювання, завдяки тому, що підвищують рівень когнітивної стимуляції, самопочуття й зменшують ізоляцію [5]. У пасивній терапії робот бере на себе управління рухами кінцівок пацієнта, що не вимагає активних зусиль з його боку. Це дає змогу уникати затримки в розвитку м'язів, а також допомагає відновити рухову активність. Активна терапія передбачає відновлення нейропластичності мозку, перенавчання та відновлення рухових навичок завдяки активній участі пацієнта. Така терапія забезпечує взаємний розвиток обох кінцівок [3].

Роботи, яких використовують у стаціонарі або реабілітаційних центрах, призначені для надання інтенсивної терапії під безпосереднім наглядом фахівців. Як приклад, екзоскелет BRAVO для ре-

білітації верхніх кінцівок використовують у клінічних умовах [1].

Деякі роботизовані системи були адаптовані для використання вдома, надаючи пацієнтам можливість продовжувати терапію в комфорті власного місця проживання. Наприклад, роботизовані рукавички, як-от HandSOME, використовують для покращення спритності рук. Роботизовані системи для параметризованої та дистанційно керованої терапії фахівцями за допомогою технологій IoT можна використовувати в контексті телетерапії [2].

Структуровані пристрої кінцевого ефекту зосереджені на взаємодії з однією або декількома певними частинами тіла (кінцевими ефекторами), як-от руки, ноги або голова. Їх використовують у спеціальних реабілітаційних вправах, забезпечуючи допоміжні рухи та сенсорний зворотний зв'язок. Vi-Manu-Track є прикладом кінцевого ефекторного пристрою [1].

Екзоскелети – зовнішні роботизовані пристрої, які монтуються на тілі, забезпечуючи рухову підтримку та допомогу людям з інвалідністю. Їх особливо використовують для реабілітації пацієнтів з паралічем або м'язовою слабкістю, полегшуючи рухи верхніх або нижніх кінцівок за допомогою механічної підтримки та іноді електричної стимуляції. Приклади екзоскелетів містять ARMin III і T-WREX [2].

Носима робототехніка – це легкі та гнучкі пристрої, які можна носити на тілі, забезпечуючи безперервну підтримку в повсякденній діяльності або реабілітаційних вправах. Вони ідеально підходять для тривалого використання, особливо в домашніх умовах. М'яка робототехніка використовує гнучкі та адаптовані матеріали, які імітують природні рухи людського тіла [4].

У роботизованих системах використовують електродвигуни (AC/DC), а також гідравлічні та пневматичні приводи. Функціональна електрична стимуляція (FES) передбачає застосування електричних імпульсів до м'язів, щоб викликати м'язові скорочення. Контроль із відкритим циклом використовують у роботизованих системах на початкових етапах реабілітації, де точний контроль є менш критичним. Ці системи попередньо працюють і їхня робота не коригується в режимі реального часу. Також роботизовані системи з відкритим циклом працюють без прямого зворотного зв'язку [2].

ППП-регулятори із замкнутим контуром (пропорційно-інтегрально-похідні) широко використовують завдяки простоті та здатності забезпечувати стабільне й ефективне керування для різноманітних завдань.

Надійне керування, що застосовується в роботизованих реабілітаційних системах, використовує дробовий підхід для керування екзоскелетом із семи ступенями свободи (DoF), забезпечуючи ефективне керування динамікою тертя та збуреннями. Головною перевагою є його вдосконалена здатність протистояти невизначеності, змінам параметрів і збуренням, як-от тремтіння рук пацієнта. Адаптивне керування з активним придушенням перешкод (ADRC) змінює свою поведінку, щоб адаптуватися до змін параметрів системи або невизначених параметрів. Йому віддають перевагу через його здатність спрощувати систему керування, водночас надаючи розширені можливості усунення збурень і невизначеності [4]. Гібридне управління поєднує елементи системи відкритого й замкнутого циклу, забезпечуючи гнучкість лікування шляхом адаптації до різних етапів реабілітації. Тип структури контролю не є головним у цій роботі, оскільки всі визначені типи довели свою ефективність [2]. Перетворювачі сил і крутних моментів, прикладених пацієнтом або роботом, забезпечують зворотний зв'язок для допомоги в налаштуванні. Основна перевага полягає у вимірюванні або генеруванні крутних моментів, що може бути дуже точно досягнуто в роботах порів-

няно з традиційною мануальною терапією, де цей аспект є суб'єктивним. Оптичні кодери використовують для вимірювання положення та кутової швидкості, забезпечуючи точне керування рухом. ЕМГ (електроміографічні) сигнали фіксують активність м'язів, щоб ініціювати або керувати рухом робота, сприяючи більш природній та інтуїтивно зрозумілій взаємодії з користувачем. Вимірювання тиску допомагає визначити прикладену силу та належним чином налаштувати допомогу в разі гідравлічних або пневматичних приводів [4].

В алгоритмі розв'язування задач, пов'язаних із заявленими реабілітаційними засобами, зокрема для реабілітації верхньої кінцівки пацієнтів із неврологічними дисфункціями, використовують метод абстрагування розв'язуваної задачі в певну узагальнену задачу, яка базується на трьох етапах: 1. Підготовка рішення з погляду можливостей пацієнта (з урахуванням здорових частин тіла). 2. Підготовка рішення з погляду можливостей (з урахуванням уражених частин тіла пацієнта, які потребують реабілітації). 3. Підготовка рішення з погляду використання поточних можливостей пацієнта для підтримки виконання завдань, які потрібно практикувати в цей момент [2; 5].

Висновки. У статті проаналізовано сучасні роботизовані технології, які підтримують реабілітацію пацієнтів після травм, акцентуючи на компактних та спеціалізованих рішеннях для конкретних елементів реабілітаційного процесу. Запропоновано алгоритм розробки таких технологій, а також методологію оцінки їх ефективності та відповідності реальним потребам майбутніх користувачів. Отримані результати можуть стати основою для подальшого вдосконалення реабілітаційних пристроїв та сприятимуть розробці нових проєктів у цій галузі. Упровадження описаних рішень має потенціал значно підвищити якість реабілітації, скоротити її тривалість і покращити якість життя пацієнтів. Перспективи додаткових досліджень спрямовані на вдосконалення технологій, усунення поточних обмежень і розробку методів підвищення ефективності роботизованих пристроїв у клінічній практиці.

ЛІТЕРАТУРА

1. Assistive Robotics for Upper Limb Physical Rehabilitation: A Systematic Review and Future Prospects/A. Guatibonza et al. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2024. Vol. 37, no. 1. URL: 10.1186/s10033-024-01056-y.
2. Banyai A. D., Brişan C. Robotics in Physical Rehabilitation: Systematic Review. Healthcare. 2024. Vol. 12, no. 17. P. 1720. URL: 10.3390/healthcare12171720.
3. Fukui R., Lovegreen W. Robotics in Rehabilitation Medicine: Prosthetics, Exoskeletons, All Else in Rehabilitation Medicine. Robotics in Physical Medicine and Rehabilitation. 2025. P. 65–91. URL: 10.1016/b978-0-323-87865-4.00006-6.
4. Gonçalves R. S., Carvalho J. C. M. Robot Modeling for Physical Rehabilitation. Robotics. P. 1212–1232. URL: 10.4018/978-1-4666-4607-0.ch058.

5. Andersen R., Davis S., Scoville C. Rehabilitation of Military Amputees: From Injury to Independence. *Orthopedics*. 2008. Vol. 31, no. 10. P. 1000–1002. DOI: 10.3928/01477447-20110525-05.
6. De Cubber G., Schneider F. E. Military Robotics. *Encyclopedia of Robotics*. Berlin, Heidelberg, 2023. P. 1–16. DOI: 10.1007/978-3-642-41610-1_219-2.
7. Robotic therapy for phantom limb pain in upper limb amputees / P. W. Snow et al. *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, London, 17–20 July 2017. 2017. DOI: 10.1109/icorr.2017.8009383.
8. Talbot L. A., Brede E., Metter E. J. Psychological and Physical Health in Military Amputees During Rehabilitation: Secondary Analysis of a Randomized Controlled Trial. *Military Medicine*. 2017. Vol. 182, no. 5. P. e1619-e1624. DOI: 10.7205/milmed-d-16-00328.
9. Trends of Robotic Systems for Hand Rehabilitation / J. Y. Min et al. *Journal of Rehabilitation Welfare Engineering & Assistive Technology*. 2023. Vol. 17, no. 4. P. 321–330. DOI: 10.21288/resko.2023.17.4.321.
10. Wood P., Small C., Mahoney P. Perioperative and early rehabilitation outcomes following osseointegration in UK military amputees. *BMJ Military Health*. 2019. Vol. 166, no. 5. P. 294–301. DOI: 10.1136/jramc-2019-001185.
11. Advanced Robotic Therapy Integrated Centers (ARTIC): an international collaboration facilitating the application of rehabilitation technologies / H. J. A. van Hedel et al. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2018. Vol. 15, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0366-y> (date of access: 10.02.2025).

REFERENCES

1. Guatibonza, A., Solaque, L., Velasco, A., & Peñuela, L. (2024). Assistive Robotics for Upper Limb Physical Rehabilitation: A Systematic Review and Future Prospects. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 37(1). DOI: 10.1186/s10033-024-01056-y
2. Banyai, A. D., & Brişan, C. (2024). Robotics in Physical Rehabilitation: Systematic Review. *Healthcare*, 12(17), 1720. DOI:10.3390/healthcare12171720
3. Fukui, R., & Lovegreen, W. (2025). Robotics in Rehabilitation Medicine: Prosthetics, Exoskeletons, All Else in Rehabilitation Medicine. *Robotics in Physical Medicine and Rehabilitation* (c. 65–91). Elsevier. DOI: 10.1016/b978-0-323-87865-4.00006-6
4. Gonçalves, R. S., & Carvalho, J. C. M. (б. д.). Robot Modeling for Physical Rehabilitation. *Robotics* (c. 1212–1232). IGI Global. DOI: 10.4018/978-1-4666-4607-0.ch058
5. Andersen, R., Davis, S., & Scoville, C. (2008). Rehabilitation of Military Amputees: From Injury to Independence. *Orthopedics*, 31(10), 1000–1002. DOI: 10.3928/01477447-20110525-05
6. De Cubber, G., & Schneider, F. E. (2023). Military Robotics. *Encyclopedia of Robotics* (c. 1–16). Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-41610-1_219-2
7. Snow, P. W., Sedki, I., Sinisi, M., Comley, R., & Loureiro, R. C. V. (2017). Robotic therapy for phantom limb pain in upper limb amputees. *Y 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. IEEE. DOI: 10.1109/icorr.2017.8009383
8. Talbot, L. A., Brede, E., & Metter, E. J. (2017). Psychological and Physical Health in Military Amputees During Rehabilitation: Secondary Analysis of a Randomized Controlled Trial. *Military Medicine*, 182(5), e1619-e1624. DOI: 10.7205/milmed-d-16-00328
9. Min, J. Y., Moon, H. J., Shin, H. H., & Lee, Y. C. (2023). Trends of Robotic Systems for Hand Rehabilitation. *Journal of Rehabilitation Welfare Engineering & Assistive Technology*, 17(4), 321–330. 10.21288/resko.2023.17.4.321
10. Wood, P., Small, C., & Mahoney, P. (2019). Perioperative and early rehabilitation outcomes following osseointegration in UK military amputees. *BMJ Military Health*, 166(5), 294–301. DOI:10.1136/jramc-2019-001185
11. van Hedel, H. J. A., Severini, G., Scarton, A., O'Brien, A., et al. (2018). Advanced Robotic Therapy Integrated Centers (ARTIC): an international collaboration facilitating the application of rehabilitation technologies. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0366-y>