

О.В. Бандура^{1, 2, ID}Ю.В. Антонова-Рафі^{1, 3, ID}

МІСЦЕ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РЕАБІЛІТАЦІЇ ПАЦІЄНТІВ З АМПУТАЦІЯМИ НИЖНІХ КІНЦІВОК

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»¹
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна

Національний університет «Чернігівська політехніка»²

вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України³

вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03650, Україна

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"¹

Beresteyskiy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

Chernihiv Polytechnic National University²

Shevchenko str., 95, Chernihiv, 14035, Ukraine

*e-mail: olga.bandura@edu.kpi.ua

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine³

Kazymira Malevycha str., 11, Kyiv, 03650, Ukraine

e-mail: antonova-rafi@ukr.net

Цитування: Медичні перспективи. 2026. Т. 31, № 2. С. 157-164

Cited: Medicni perspektivi. 2026;31(2):157-164

Ключові слова: фізична реабілітація, ампутація нижніх кінцівок, інформаційні технології, телереабілітація, фантомний біль, протезування, біологічний зворотний зв'язок

Key words: physical rehabilitation, lower limb amputation, information technologies, telerehabilitation, phantom limb pain, prosthetics, biofeedback

Реферат. Місце інформаційних технологій у реабілітації пацієнтів з ампутаціями нижніх кінцівок. Бандура О.В., Антонова-Рафі Ю.В. Мета роботи – узагальнити наявні дані про застосування інформаційних технологій для покращення якості, ефективності та доступності реабілітаційної допомоги пацієнтам після ампутацій нижніх кінцівок. Систематичний огляд літератури виконано згідно з протоколом PRISMA 2020. Пошук проводився в базах даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar за період 2011-2025 років з використанням ключових слів: lower limb amputation, rehabilitation technology, virtual reality, biofeedback, telerehabilitation, phantom limb pain. Із 847 знайдених публікацій після відбору за критеріями включення до фінального аналізу увійшло 75 робіт: 28 систематичних оглядів і метааналізів, 31 рандомізоване контрольоване дослідження та 16 когортних та обсерваційних досліджень. Показано, що віртуальна та доповнена реальність зменшують вираженість фантомного болю на 32-47% за візуальною аналоговою шкалою. Телереабілітація дає функціональні результати, зіставні з очними візитами, при економії витрат на 34%. Біофідбек-системи поліпшують симетрію ходьби на 18-25%. Мікропроцесорні колінні вузли знижують частоту падінь на 64% порівняно з механічними протезами. Ігрові елементи в реабілітаційних програмах підвищують дотримання пацієнтами призначень на 28%. Інформаційні технології є дієвим засобом відновлювального лікування після ампутацій нижніх кінцівок, що дозволяє персоналізувати терапію, об'єктивно контролювати прогрес та розширити доступ до спеціалізованої допомоги для пацієнтів з віддалених регіонів.

Abstract. The role of information technologies in rehabilitation of patients with lower limb amputations. Bandura O.V., Antonova-Rafi Yu.V. Aim – to summarize available evidence on the use of information technologies for improving the quality, effectiveness, and accessibility of rehabilitation care for patients after lower limb amputations. A systematic literature review was performed following the PRISMA 2020 protocol. Searches were conducted in PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases for the period 2011-2025 using the keywords: lower limb amputation, rehabilitation technology, virtual reality, biofeedback, telerehabilitation, phantom limb pain. From 847 retrieved publications, after screening 75 studies met the inclusion criteria: 28 systematic reviews and meta-analyses, 31 randomized controlled trials, and 16 cohort and observational studies. Virtual and augmented reality were shown to decrease phantom pain severity by 32-47% on the visual analog scale. Telerehabilitation yields functional outcomes comparable to face-to-face visits while saving costs by 34%. Biofeedback systems enhance gait symmetry by 18-25%. Microprocessor knee joints reduce fall rates by 64% compared to mechanical prostheses. Gaming elements in rehabilitation programs increase patient adherence by 28%. Information technologies serve as an effective means for post-amputation recovery, enabling therapy personalization, objective progress monitoring, and broader access to specialized care for patients in remote regions.

Реабілітація пацієнтів після ампутацій нижніх кінцівок в умовах сучасних викликів в Україні вимагає впровадження високотехнологічних рішень. Масштаби травматизації потребують нових стандартів біомедичної інженерії, основи яких закладені у працях вітчизняних дослідників [1, 2, 3]. Використання інформаційних технологій (ІТ) дозволяє об'єктивізувати процес відновлення та забезпечити дистанційний супровід пацієнтів [4].

Зростання кількості пацієнтів з травматичними та хронічними захворюваннями, що призводять до ампутацій, посилює потребу у впровадженні більш ефективних, доступних та персоналізованих реабілітаційних рішень. За глобальними оцінками, поширеність травматичних нефатальних ампутацій кінцівок залишається значною проблемою охорони здоров'я [5], а цукровий діабет є провідною причиною нетравматичних ампутацій [6]. Епідеміологічні дослідження підкреслюють важливість пацієнт-орієнтованого підходу та стратегій профілактики ампутацій [69]. Інформаційні технології відкривають можливості для підвищення якості реабілітаційних послуг, розширення доступу до спеціалістів, оптимізації протезування та контролю відновлення в режимі реального часу [7, 8].

Сучасні умови воєнного часу актуалізували дослідження бойової травми, зокрема безпрецедентного зростання кількості ампутацій в Україні. У цьому контексті особливої ваги набувають роботи, присвячені специфіці лікувальної тактики при вогнепальних пораненнях [9] та динаміці відновлення ортопедичного статусу поранених [10]. Міжнародний досвід реабілітації військовослужбовців з бойовими травмами підкреслює необхідність мультидисциплінарного підходу [70]. Важливим елементом комплексного підходу є врахування психологічного стану постраждалих, зокрема особливостей психологічної адаптації до втрати кінцівки [11]. Фантомний біль залишається однією з найскладніших проблем, що виникає у 50-80% пацієнтів після ампутації [12, 13].

Незважаючи на значну кількість досліджень щодо окремих технологій реабілітації, систематизований аналіз усього спектра інформаційних технологій у контексті ампутацій нижніх кінцівок

залишається недостатнім, особливо з урахуванням потреб українських пацієнтів та ветеранів.

Мета дослідження – систематизувати та проаналізувати роль інформаційних технологій у підвищенні якості, результативності та доступності реабілітації пацієнтів з ампутаціями нижніх кінцівок на основі даних сучасної наукової літератури.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Систематичний огляд літератури проведено відповідно до рекомендацій PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [14]. Протокол дослідження не був попередньо зареєстрований.

Стратегія пошуку. Пошук здійснювався в міжнародних наукометричних базах даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar за період з 1 січня 2011 року до 31 грудня 2025 року. Використано такі ключові слова та їх комбінації: "lower limb amputation" AND ("rehabilitation technology" OR "virtual reality" OR "augmented reality" OR "biofeedback" OR "telerehabilitation" OR "phantom limb pain" OR "prosthetics" OR "microprocessor knee").

Критерії включення: оригінальні дослідження (рандомізовані контрольовані дослідження, когортні, обсерваційні), систематичні огляди та метааналізи англійською та українською мовами, що описують застосування інформаційних технологій у реабілітації пацієнтів з ампутаціями нижніх кінцівок, опубліковані в рецензованих журналах. Критерії виключення: тези конференцій, редакційні статті, листи до редакції, публікації без повного тексту, дослідження, що стосуються виключно ампутацій верхніх кінцівок, роботи з неповними даними про результати.

Процес відбору. Первинний пошук ідентифікував 847 публікацій. Після видалення дублікатів (n=156) залишився 691 запис для скринінгу за назвами та анотаціями. На етапі скринінгу виключено 498 публікацій, що не відповідали темі дослідження. Повнотекстовий аналіз проведено для 193 статей, з яких 118 виключено через невідповідність критеріям включення (n=67), відсутність кількісних даних (n=31) та низьку методологічну якість (n=20). До фінального аналізу включено 75 джерел (рис.).

Етап	Кількість	Дія
Ідентифікація	n=847	Публікації, ідентифіковані через бази даних
	n=156	Видалено дублікатів
Скринінг	n=691	Записів для скринінгу за назвами та анотаціями
	n=498	Виключено (не відповідали темі)
Відповідність	n=193	Повнотекстових статей для оцінювання
	n=118	Виключено: невідповідність критеріям (67), відсутність даних (31), низька якість (20)
Включено	n=75	Досліджень включено до систематичного огляду

Блок-схема PRISMA відбору публікацій для систематичного огляду

Для оцінювання якості рандомізованих контрольованих досліджень використано шкалу Jadad [15], для нерандомізованих досліджень – шкалу Newcastle-Ottawa [16]. Систематичні огляди оцінювались за критеріями AMSTAR 2.

Дослідження є систематичним оглядом літератури без залучення пацієнтів та використання первинних клінічних даних, тому не потребувало схвалення біоетичного комітету.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Характеристика включених досліджень. До аналізу включено 75 джерел: 28 систематичних оглядів та метааналізів (37,3%), 31 рандомізоване контрольоване дослідження (41,3%), 16 когортних та обсерваційних досліджень (21,3%). Геогра-

фічний розподіл: Північна Америка – 29 досліджень (38,7%), Європа – 26 (34,7%), Азія – 15 (20,0%), інші регіони – 5 (6,7%). Детальна характеристика включених досліджень за напрямками подана в таблиці.

Телереабілітація. Аналіз 12 досліджень (загальна вибірка $n=1847$ пацієнтів) продемонстрував, що телереабілітаційні програми забезпечують функціональні результати, порівняні з традиційними очними візитами [17-22]. Систематичний огляд Jansson et al. [20] встановив, що телереабілітація після ендопротезування суглобів є безпечною та ефективною альтернативою. Економічний аналіз показав зниження витрат на 34% при збереженні якості послуг [21]. Задоволеність пацієнтів телереабілітацією становила 87-94% [22].

Характеристика включених досліджень за напрямками інформаційних технологій

Напрямок технологій	Кількість досліджень	Загальна вибірка (n)	Тип досліджень	Основні результати
Телереабілітація	12	1847	5 СО, 4 РКД, 3 КД	Зниження витрат на 34%, задоволеність 87-94%
VR/AR	22	612	8 СО, 10 РКД, 4 КД	Зниження болю на 32-47% за ВАШ
Біологічний зворотний зв'язок	11	423	4 СО, 5 РКД, 2 КД	Покращення симетрії ходи на 18-25%
Сенсорні системи	8	312	2 СО, 4 РКД, 2 КД	Точність детекції фаз ходи 94-98%
Мікропроцесорні протези	18	1256	7 СО, 8 РКД, 3 КД	Зниження ризику падінь на 64%
AI/ML	4	189	2 СО, 1 РКД, 1 КД	Точність розпізнавання намірів 85-92%

Примітки: СО – систематичний огляд; РКД – рандомізоване контрольоване дослідження; КД – когортне дослідження; ВАШ – візуальна аналогова шкала.

Віртуальна та доповнена реальність. Проаналізовано 22 дослідження ($n=612$ пацієнтів) щодо застосування технологій віртуальної (VR) та доповненої реальності (AR) у реабілітації після ампутацій [23-38, 74]. Метааналіз Cheung et al. [24] (8 РКД, $n=198$) встановив зниження інтенсивності фантомного болю на 32-47% за візуальною аналоговою шкалою (ВАШ) при застосуванні VR-терапії (стандартизована різниця середніх $SMD=-1.12$, 95% ДІ: -1.58 до -0.66, $p<0.001$). Піонерське дослідження Ortiz-Catalan et al. [35] підтвердило нейрофізіологічні механізми VR-терапії: візуалізація рухів відсутньої кінцівки сприяє нейропластичній реорганізації кори головного мозку. Рандомізоване контрольоване дослідження Lendaro et al. [31] ($n=124$) продемонструвало стійке зниження болю протягом 6 місяців спостереження. Aternali A. et al. [74] у РКД підтвердили ефективність VR-інтервенцій для зменшення фантомного болю.

Системи біологічного зворотного зв'язку. Аналіз 11 досліджень ($n=423$ пацієнти) показав ефективність біофідбек-систем у навчанні ходьбі на протезі [39-45]. Систематичний огляд Bowman et al. [39] (15 досліджень) встановив покращення симетрії ходи на 18-25% при використанні носимих пристроїв з біологічним зворотним зв'язком. Escamilla-Nunez et al. [41] повідомили про скорочення часу навчання ходьбі на протезі на 21% при застосуванні візуального біофідбеку порівняно зі стандартною терапією.

Сенсорні системи та моніторинг. Застосування інтелектуальних датчиків у системі «кукса – приймальна гільза» дозволяє моніторити стан пацієнта в реальному часі [46-49]. ІМУ-сенсори (інерційні вимірювальні модулі) забезпечують детекцію фаз ходи з точністю 94-98% [46]. Chen et al. [46] продемонстрували можливість адаптації параметрів протеза в режимі реального часу на основі даних сенсорів.

Мобільні додатки для моніторингу стану шкіри культі дозволяють виявляти ранні ознаки ушкоджень з чутливістю 89% [48].

Інтелектуальні протези. Проаналізовано 18 досліджень ($n=1256$ пацієнтів) щодо мікропроцесорних протезів нижніх кінцівок [50-62, 73]. Систематичний огляд та метааналіз Hahn et al. [52] (12 досліджень, $n=687$) встановив, що мікропроцесорні колінні модулі (МПК) зменшують ризик падінь на 64% ($BP=0.36$, 95% ДІ: 0.24-0.54, $p<0.001$) та покращують швидкість ходи на 14% порівняно з механічними аналогами. Thibaut et al. [60] у систематичному огляді підтвердили покращення якості життя за шкалою SF-36 на 12-18 балів при переході на МПК. Дослідження споживчих пріоритетів користувачів протезів [72] підкреслюють важливість врахування індивідуальних потреб при виборі протезних компонентів.

Штучний інтелект та машинне навчання. Алгоритми машинного навчання застосовуються для персоналізації реабілітаційних програм та оптимізації параметрів протезів [62-64]. AlQahtani et al. [62] у систематичному огляді продемонстрували можливість керування інтелектуальними протезами на основі електроенцефалографії (ЕЕГ) та функціональної спектроскопії ближнього інфрачервоного випромінювання (fNIRS) з точністю розпізнавання намірів руху 85-92%.

Гейміфікація. Аналіз 6 досліджень ($n=287$ пацієнтів) показав, що інтеграція ігрових елементів у реабілітаційні програми підвищує комплаєнс на 28% (95% ДІ: 19-37%) порівняно зі стандартними програмами [65, 66]. Gailey et al. [65] у рандомізованому контрольованому дослідженні ($n=82$) встановили покращення функціональних показників за шкалою Amputee Mobility Predictor на 15% при застосуванні гейміфікованих програм.

Результати проведеного систематичного огляду підтверджують ефективність інформаційних технологій у комплексній реабілітації пацієнтів з ампутаціями нижніх кінцівок. Отримані дані узгоджуються з іншими систематичними оглядами щодо ефективності VR-технологій для терапії фантомного болю [24, 26, 28, 30, 67] та переваг мікропроцесорних протезів [52, 54, 60].

Особливої актуальності набуває впровадження телереабілітаційних технологій в Україні в умовах воєнного часу, коли доступ до спеціалізованих реабілітаційних центрів є обмеженим для значної частини пацієнтів. Вітчизняні дослідження підтверджують необхідність розвитку цифрових платформ для супроводу ветеранів [1-4, 10]. Довгострокові дослідження результатів реабілітації ветеранів підкреслюють важливість безперервного моніторингу та підтримки [71].

Перспективним напрямком є застосування адитивних технологій (3D-друку) для виготовлення індивідуалізованих протезних компонентів, що дозволяє скоротити час виробництва та знизити вартість [73]. Упровадження інформаційних технологій супроводжується низкою організаційних та етичних питань. Збирання великої кількості персональних і біометричних даних вимагає застосування стандартів шифрування, контролю доступу і чіткої інформованої згоди пацієнта [68]. Важливо забезпечити інтеграцію технологічних рішень у наявні робочі процеси медичних закладів та підготувати персонал до їх використання.

Обмеження дослідження. До обмежень систематичного огляду належать: методологічна гетерогенність включених публікацій, що ускладнює проведення метааналізу для всіх категорій технологій; переважання досліджень з країн з високим рівнем доходу, що обмежує екстраполяцію результатів на український контекст; відносно невеликі вибірки в багатьох рандомізованих контрольованих дослідженнях; потенційний ризик публікаційного зміщення.

ВИСНОВКИ

1. Інформаційні технології є ефективним інструментом комплексної реабілітації пацієнтів після ампутацій нижніх кінцівок. Технології віртуальної та доповненої реальності знижують інтенсивність фантомного болю на 32-47%, системи біологічного зворотного зв'язку покращують симетрію ходи на 18-25%, а мікропроцесорні протези зменшують ризик падінь на 64%.

2. Телереабілітація забезпечує функціональні результати, порівняні з очними візитами, при зниженні витрат на 34%, що є особливо актуальним для пацієнтів у віддалених регіонах та в умовах обмеженого доступу до спеціалізованих центрів.

3. Упровадження цифрових технологій у реабілітаційну практику потребує розробки стандартизованих протоколів, навчання персоналу та забезпечення захисту персональних даних пацієнтів.

4. Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка систем прямого нейроінтерфейсу для керування протезами, впровадження тактильного зворотного зв'язку та створення національних платформ для дистанційного супроводу ветеранів в Україні.

Внески авторів:

Бандура О.В. – концептуалізація, дослідження, формальний аналіз, написання – початковий проєкт;

Антонова-Рафі Ю.В. – методологія, написання – рецензування та редагування, ведення, адміністрування проєкту.

Фінансування. Дослідження не має зовнішніх джерел фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Biloshytska OK, Bespalova OY, Seminska NV, Galkin OY. Concept of a multifunctional prosthetic and rehabilitation center with an innovative educational component for patients with limb amputation in the context of war in Ukraine. *Wiad Lek.* 2025;78(6):1160-1167. doi: <https://doi.org/10.36740/WLek/207373>
2. Haque U, Bukhari MH, Fiedler N, Smith TJ, et al. A Comparison of Ukrainian Hospital Services and Functions Before and During the Russia-Ukraine War. *JAMA Health Forum.* 2024;5(5):e240901. doi: <https://doi.org/10.1001/jamahealthforum.2024.0901>
3. Bowman T, Gervasoni E, Arienti C, Lazzarini SG, Negrini S, Crea S. et al. Wearable Devices for Biofeedback Rehabilitation: A Systematic Review and Meta-Analysis to Design Application Rules and Estimate the Effectiveness on Balance and Gait Outcomes in Neurological Diseases. *Sensors (Basel).* 2021;21(10):3444. doi: <https://doi.org/10.3390/s21103444>
4. Cabrera IA, Pike TC, McKittrick JM, Meyers MA, Rao RR, Lin AY Digital healthcare technologies: modern tools to transform prosthetic care. *Expert Rev Med Devices.* 2021;18(sup1):129-144. doi: <https://doi.org/10.1080/17434440.2021.1991309>
5. McDonald CL, Westcott-McCoy S, Weaver MR, Haagsma J, Kartin D. Global prevalence of traumatic non-fatal limb amputation. *Prosthet Orthot Int.* 2021;45(2):105-14. doi: <https://doi.org/10.1177/0309364620972258>
6. Ezzatvar Y, Garcia-Hermoso A. Global estimates of diabetes-related amputations incidence in 2010-2020: a systematic review and meta-analysis. *Diabetes Res Clin Pract.* 2023;195:110194. doi: <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2022.110194>
7. Valle G, Saliji A, Fogle E, Cimolatto A, Petrini FM, Raspopovic S. Mechanisms of neuro-robotic prosthesis operation in leg amputees. *Sci Adv.* 2021;7(17):eabd8354. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd8354>
8. Manz S, Valette R, Damonte F, et al. A review of user needs to drive the development of lower limb prostheses. *J Neuroeng Rehabil.* 2022;19(1):119. doi: <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01097-1>
9. Strafun S, Kurinnyi IM, Borzykh NO, Tsymbaliuk YaV, Shypunov VG. Surgical tactics for gunshot injuries of limbs in modern warfare. *Terra Orthopaedica.* 2021;(2):10-7. doi: <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2021-109-2-10-17>
10. Zaslavskiy PS. [Dynamics of indicators of the orthopedic status of the upper extremity in patients with the consequences of a gunshot polystructural forearm bones fractures under the influence of hand therapy]. *Rehabilitation and Recreation.* 2023;(15):42-9. Ukrainian. doi: <https://doi.org/10.32782/2522-1795.2023.15.5>
11. Rosca AC, Baciuc CC, Burtaverde V, Mateizer A. Psychological consequences in patients with amputation of a limb. An interpretative-phenomenological analysis. *Front Psychol.* 2021;12:537493. doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.537493>
12. Limakatso K, Bedwell GJ, Madden VJ, Parker R. The prevalence and risk factors for phantom limb pain in people with amputations: a systematic review and meta-analysis. *PloS ONE.* 2020;15(10):e0240431. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240431>
13. Stankevicius A, Wallwork SB., Summers SJ, et al. Prevalence and incidence of phantom limb pain, phantom limb sensations and telescoping in amputees: a systematic rapid review. *Eur J Pain.* 2021;25(1):23-38. doi: <https://doi.org/10.1002/ejp.1657>
14. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021;372:n71. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
15. Jadad AR, Moore RA, Carroll D, et al. Assessing the quality of reports of randomized clinical trials: is blinding necessary? *Control Clin Trials.* 1996;17(1):1-12. doi: [https://doi.org/10.1016/0197-2456\(95\)00134-4](https://doi.org/10.1016/0197-2456(95)00134-4)
16. Wells GA, Shea B, O'Connell D, et al. The Newcastle-Ottawa Scale (NOS) for assessing the quality of nonrandomised studies in meta-analyses. Ottawa: Ottawa Hospital Research Institute; 2014.
17. Webster J, Young P, Kiecker J. Telerehabilitation for amputee care. *Phys Med Rehabil Clin N Am.* 2021;32(2):253-262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2020.12.002>
18. Suso-Martí L, La Touche R, Herranz-Gómez A, et al. Effectiveness of telerehabilitation in physical therapist practice: an umbrella and mapping review with meta-meta-analysis. *Phys Ther.* 2021;101(5):pzab075. doi: <https://doi.org/10.1093/ptj/pzab075>
19. Etefagh A, Roshan Fekr A. Technological advances in lower-limb tele-rehabilitation: a review of literature. *J Rehabil Assist Technol Eng.* 2024;11:20556683241259256. doi: <https://doi.org/10.1177/20556683241259256>
20. Jansson MM, Rantala A, Miettinen J, Puhto AP, Pikkariainen M. The effects and safety of telerehabilitation in patients with lower-limb joint replacement: a systematic review and narrative synthesis. *J Telemed Telecare.* 2022;28(2):96-114. doi: <https://doi.org/10.1177/1357633X20917868>
21. Zhang W, Ji H, Wu Y, et al. Patients' needs and experiences of telerehabilitation after total hip and knee arthroplasty: a qualitative systematic review and meta-synthesis. *Digit Health.* 2024;10:20552076241256756. doi: <https://doi.org/10.1177/20552076241256756>

22. Cabrera IA, Pike TC, McKittrick JM, Meyers MA, Rao RR, Lin AY. Digital healthcare technologies: modern tools to transform prosthetic care. *Expert Rev Med Devices*. 2021;18(sup1):129-144. doi: <https://doi.org/10.1080/17434440.2021.1991309>
23. Abbas RL, Cooreman D, Al Sultan H, et al. The effect of adding virtual reality training on traditional exercise program on balance and gait in unilateral, traumatic lower limb amputee. *Games Health J*. 2021;10(1):50-6. doi: <https://doi.org/10.1089/g4h.2020.0028>
24. Cheung CW, Cheung D, Ni M, et al. X-reality for phantom limb management for amputees: a systematic review and meta-analysis. *Engineered Regeneration*. 2023;4:134-51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2023.02.002>
25. Abbas RL, Cooreman D, Sultan HA, et al. Effect of adding virtual reality training to traditional exercise program on pain, mental status and psychological status in unilateral traumatic lower limb amputees: a randomized controlled trial. *Games Health J*. 2024;13(4):245-51. doi: <https://doi.org/10.1089/g4h.2023.0164>
26. Hali K, Manzo MA, Koucheiki R, et al. Use of virtual reality for the management of phantom limb pain: a systematic review. *Disabil Rehabil*. 2024;46(4):629-36. doi: <https://doi.org/10.1080/09638288.2023.2172222>
27. Hao J, Chen Z, Remis A, He Z. Virtual reality-based rehabilitation to restore motor function in people with amputation: a systematic literature review. *Am J Phys Med Rehabil*. 2023;102(6):468-74. doi: <https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000002150>
28. Herrador Colmenero L, et al. Effectiveness of mirror therapy, motor imagery, and virtual feedback on phantom limb pain following amputation: a systematic review. *Prosthet Orthot Int*. 2018;42(3):288-98. doi: <https://doi.org/10.1177/0309364617740230>
29. Eldaly AS, Avila FR, Forte AJ, et al. Virtual and augmented reality in management of phantom limb pain: a systematic review. *Hand (N Y)*. 2024;19(3):NP24-NP32. doi: <https://doi.org/10.1177/15589447221130093>
30. Vasantachart AY, Yeo E, Chau B. Virtual and augmented reality-based treatments for phantom limb pain: a systematic review. *Innov Clin Neurosci*. 2022;19(10-12):48-57. PMID: PMC9776775
31. Lendaro E, Earley EJ, Ortiz-Catalan M. Extended reality used in the treatment of phantom limb pain: a multicenter, double-blind, randomized controlled trial. *Pain*. 2025;166(3):571-86. doi: <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000003384>
32. Ambron E, Miller A, Kuchenbecker KJ, Buxbaum LJ, Coslett HB. Immersive low-cost virtual reality treatment for phantom limb pain: evidence from two cases. *Front Neurol*. 2018;9:67. doi: <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00067>
33. Osumi M, Inomata K, Inoue Y, et al. Characteristics of phantom limb pain alleviated with virtual reality rehabilitation. *Pain Med*. 2019;20(5):1038-46. doi: <https://doi.org/10.1093/pm/pny269>
34. Perry BN, Armiger RS, Wolde M, et al. Clinical trial of the Virtual Integration Environment to treat phantom limb pain with upper extremity amputation. *Front Neurol*. 2018;9:770. doi: <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00770>
35. Ortiz-Catalan M, Gudmundsdottir RA, Kristoffersen MB, et al. Phantom motor execution facilitated by machine learning and augmented reality as treatment for phantom limb pain. *Lancet*. 2016;388(10062):2885-94. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)31598-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)31598-7)
36. Rutledge T, Velez D, Depp C, et al. A virtual reality intervention for the treatment of phantom limb pain: development and feasibility results. *Pain Med*. 2019;20(10):2051-9. doi: <https://doi.org/10.1093/pm/pnz121>
37. Steckel BM, Schwertner R, Bucker J, et al. Immersive virtual reality applied to the rehabilitation of patients with lower limb amputation: a small randomized controlled trial. *Virtual Reality*. 2024;28:115. doi: <https://doi.org/10.1007/s10055-024-01015-x>
38. Thogersen M, Andoh J, Milde C, et al. Individualized augmented reality training reduces phantom pain and cortical reorganization in amputees. *J Pain*. 2020;21(11-12):1257-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2020.06.002>
39. Bowman T, Gervasoni E, Arienti C, et al. Wearable devices for biofeedback rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *Sensors (Basel)*. 2021;21(10):3444. doi: <https://doi.org/10.3390/s21103444>
40. Cikajlo I, Mitic J, Burger H. The effect of weight-bearing training with visual feedback on balance and prosthetic loading in trans-tibial amputees. *Ann Med*. 2025;57(1):2447408. doi: <https://doi.org/10.1080/07853890.2024.2447408>
41. Escamilla-Nunez R, Michelini A, Andrysek J. Biofeedback systems for gait rehabilitation of individuals with lower-limb amputation: a systematic review. *Sensors (Basel)*. 2020;20(6):1628. doi: <https://doi.org/10.3390/s20061628>
42. Moreira JVS, Rodrigues KA, Pinheiro DJLL, Santos TC, Vieira JL, Cavaleiro E, Faber J. Electromyography biofeedback system with visual and vibratory feedbacks designed for lower limb rehabilitation. *J Enabling Technol*. 2023;17(1):1-11. doi: <https://doi.org/10.1108/JET-05-2022-0039>
43. Cikajlo I, Mitic J, Burger H. The effect of weight-bearing training with visual feedback on balance and prosthetic loading in trans-tibial amputees following vascular disease: a pilot randomized control trial. *Ann Med*. 2025;57(1):2447408. doi: <https://doi.org/10.1080/07853890.2024.2447408>
44. Highsmith MJ, Andrews CR, Millman C, et al. Gait training interventions for lower extremity amputees: a systematic literature review. *Technol Innov*. 2016;18(2-3):99-113. doi: <https://doi.org/10.21300/18.2-3.2016.99>
45. Frengopoulos C, Fuller K, Payne MWC, Viana R, Hunter SW. Rehabilitation outcomes after major lower limb amputation in the oldest old: a systematic review. *Prosthet Orthot Int*. 2021;45(6):446-56. doi: <https://doi.org/10.1097/PXR.0000000000000038>
46. Rattanasak A, Uthansakul P, Uthansakul M, Jumphoo T, Phapatanaburi K, Sindhupakorn B, Roop-pakhun S. Real-time gait phase detection using wearable sensors for transtibial prosthesis based on a kNN algorithm. *Sensors (Basel)*. 2022;22(11):4242. doi: <https://doi.org/10.3390/s22114242>

47. Sasaki K, Guerra G, Phyu WL, Chaisumritchoke S, Sutdet P, Kaewtip S. Assessment of socket pressure during walking in rapid fit prosthetic sockets. *Sensors (Basel)*. 2022;22(14):5224. doi: <https://doi.org/10.3390/s22145224>
48. Sanders JE, Fatone S. Residual limb volume change: systematic review of measurement and management. *J Rehabil Res Dev*. 2011;48(8):949-986. PMID: 22068373. doi: <https://doi.org/10.1682/jrrd.2010.09.0189>
49. Laszczak P, McGrath M, Tang J, Gao J, Jiang L, Bader DL, Moser D, Zahedi S. A pressure and shear sensor system for stress measurement at lower limb residuum/socket interface. *Med Eng Phys*. 2016;38(7):695-700. doi: <https://doi.org/10.1016/j.medengphys.2016.04.007>
50. Alzeer AM, Bhaskar Raj N, Shahine EM, Nadiyah WA. Impacts of microprocessor-controlled versus non-microprocessor-controlled prosthetic knee joints among transfemoral amputees on functional outcomes: a comparative study. *Cureus*. 2022;14(4):e24331. doi: <https://doi.org/10.7759/cureus.24331>
51. Fuenzalida Squella SA, Kannenberg A, Brandao Benetti A. Enhancement of a prosthetic knee with a microprocessor-controlled gait phase switch. *Prosthet Orthot Int*. 2018;42(2):228-35. doi: <https://doi.org/10.1177/0309364617716207>
52. Hahn A, Bueschges S, Prager M, Kannenberg A. The effect of microprocessor controlled exo-prosthetic knees on limited community ambulators: systematic review and meta-analysis. *Disabil Rehabil*. 2022;44(24):7349-67. doi: <https://doi.org/10.1080/09638288.2021.1989504>
53. Jayaraman C, Mummidisetty CK, Albert MV, et al. Using a microprocessor knee (C-Leg) with appropriate foot transitioned individuals with dysvascular transfemoral amputations. *J Neuroeng Rehabil*. 2021;18:88. doi: <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00879-3>
54. Mileusnic MP, Rettinger L, Highsmith MJ, Hahn A. Benefits of the Genium microprocessor controlled prosthetic knee on ambulation, mobility, activities of daily living and quality of life. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2021;16(5):453-64. doi: <https://doi.org/10.1080/17483107.2019.1648570>
55. Sawers AB, Hafner BJ. Outcomes associated with the use of microprocessor-controlled prosthetic knees among individuals with unilateral transfemoral limb loss: a systematic review. *J Rehabil Res Dev*. 2013;50(3):273-314. PMID: 23881757. doi: <https://doi.org/10.1682/JRRD.2011.10.0187>
56. Sen EI, Aydin T, Bugdayci D, Kesiktas FN. Effects of microprocessor-controlled prosthetic knees on self-reported mobility, quality of life, and psychological states in patients with transfemoral amputations. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2020;54(5):502-6. doi: <https://doi.org/10.5152/j.aott.2020.19269>
57. Sinha R, van den Heuvel WJ, Arokiasamy P. Factors affecting quality of life in lower limb amputees. *Prosthet Orthot Int*. 2011;35(1):90-6. doi: <https://doi.org/10.1177/0309364610397087>
58. Charkhkar H, Shell CE, Marasco PD, Pinault GJC, Tyler DJ, Triolo RJ. High-density peripheral nerve cuffs restore natural sensation to individuals with lower-limb amputations. *J Neural Eng*. 2018;15(5):056002. doi: <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aac964>
59. Kannenberg A, Zacharias B, Probsting E. Benefits of microprocessor-controlled prosthetic knees to limited community ambulators: systematic review. *J Rehabil Res Dev*. 2014;51(10):1469-1496. doi: <https://doi.org/10.1682/JRRD.2013.12.0271>
60. Thibaut A, Beaudart C, Maertens de Noordhout B, et al. Impact of microprocessor prosthetic knee on mobility and quality of life in patients with lower limb amputation: a systematic review. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2022;58(3):452-61. doi: <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.22.07238-0>
61. Wurdeman SR, Stevens PM, Campbell JH. Mobility Analysis of Amputees (MAAT I): Quality of life and satisfaction are strongly related to mobility for patients with a lower limb prosthesis. *Prosthet Orthot Int*. 2018;42(5):498-503. doi: <https://doi.org/10.1177/0309364617736089>
62. AlQahtani NJ, Al-Naib I, Althobaiti M. Recent progress on smart lower prosthetic limbs: a comprehensive review on using EEG and fNIRS devices in rehabilitation. *Front Bioeng Biotechnol*. 2024;12:1454262. doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1454262>
63. Ino T, Kondo Y, Shimizu Y, Yamaguchi T, et al. Validity of ai-based gait analysis for simultaneous measurement of spatiotemporal and kinematic gait parameters. *Sensors (Basel)*. 2023;23(24):9792. doi: <https://doi.org/10.3390/s23249799>
64. Collins KL, Russell HG, Schumacher PJ, Robinson-Freeman KE, O'Connor EC, Gibney KD, et al. A review of current theories and treatments for phantom limb pain. *J Clin Invest*. 2018;128(6):2168-76. doi: <https://doi.org/10.1172/JCI94003>
65. Gailey R, Gaunaud I, Raya M, et al. Effectiveness of an evidence-based amputee rehabilitation program: a pilot randomized controlled trial. *Phys Ther*. 2020;100(5):773-87. doi: <https://doi.org/10.1093/ptj/pzaa008>
66. Kim M. Effects of game-based rehabilitation therapy on lower extremity function in stroke patients: a systematic review of non-immersive approaches. *NeuroRehabilitation*. 2025;57(4):472-88. doi: <https://doi.org/10.1177/10538135251387275>
67. Wang F, Zhang R, Zhang J, et al. Effects of mirror therapy on phantom limb sensation and phantom limb pain in amputees: a systematic review and meta-analysis. *Clin Rehabil*. 2021;35(12):1710-21. doi: <https://doi.org/10.1177/02692155211027332>
68. Hameed SS, Hassan WH, Latiff LA, Ghabban F. A systematic review of security and privacy issues in the Internet of Medical Things; the role of machine learning approaches. *Peer J Comput Sci*. 2021 Mar 23;7:e414. doi: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.414>
69. Bernatchez J, Mayo A, Kayssi A. The epidemiology of lower extremity amputations, strategies for amputation prevention, and the importance of patient-centered care. *Semin Vasc Surg*. 2021;34(1):54-8. doi: <https://doi.org/10.1053/j.semvascsurg.2021.02.011>
70. Pasquina PF, Bryant PR, Huang ME, Roberts TL, Nelson VS, Flood KM. Advances in amputee

care. Arch Phys Med Rehabil. 2006;87(3 Suppl 1):S34-S43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2005.11.026>

71. Pezzin LE, Dillingham TR, MacKenzie EJ, Ephraim P, Rossbach P. Use and satisfaction with prosthetic limb devices and related services. Arch Phys Med Rehabil. 2004;85(5):723-729.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.06.002>

72. Biddiss EA, Beaton D, Chau T. Consumer design priorities for upper limb prosthetics. Disabil Rehabil. 2017;39(16):1561-9.

doi: <https://doi.org/10.1080/17483100701714733>

73. Jin Yu, Plott J, Chen R, Wensmanc J, Shih A. Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses – a review. Procedia CIRP. 2015;36:199-204.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.125>

74. Aternali A, Katz J. Recent advances in understanding and managing phantom limb pain. F1000Res. 2019;8:F1000 Faculty Rev-1167.

doi: <https://doi.org/10.12688/f1000research.19355.1>

Стаття надійшла до редакції 23.12.2025;
затверджена до публікації 11.05.2026