

НЕСТЕРЧУК Наталія

доктор наук з фізичного виховання і спорту, професор, завідувач навчально-наукового інституту охорони здоров'я,

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-2199-3403>

n.e.nesterchuk@nuwm.edu.ua

КОВАЛЬЧУК Юрій

аспірант кафедри фізичної терапії, ерготерапії навчально-наукового інституту охорони здоров'я, Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

<https://orcid.org/0009-0000-8468-1293>

yu.a.kovalchuk@nuwm.edu.ua

РОБОТИЗОВАНІ МЕТОДИ РЕАБІЛІТАЦІЇ ХОДЬБИ ПІСЛЯ НЕПОВНОЇ ТРАВМИ СПИННОГО МОЗКУ: ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

Використання роботизованих методів для відновлення ходьби після перенесеної травми спинного мозку це перспективний напрям сучасної реабілітації, який сприяє покращенню незалежності пацієнтів. Дана оглядова стаття розглядає ефективність роботизованих методів реабілітації хворих з неповними ушкодженнями спинного мозку, їхній вплив на відновлення ходьби та порівняльні характеристики різних методів. Актуальність зумовлена постійною необхідністю вдосконалення методів функціонального відновлення пацієнтів зі збереженою руховою активністю. Роботизовані методи являється інноваційним підходом, що поєднує механічну підтримку з потенціалом нейропластичності. Проте, залишається відкритим питання ефективності втручання та інтегрування даних методик у практику фізичної терапії. Метою дослідження є узагальнення актуальних наукових даних щодо застосування роботизованих методів для відновлення ходьби після неповної травми спинного мозку, з акцентом на показники впливу: швидкість, витривалість та здатність до самостійного пересування. У роботі використано метод систематичного огляду, який охоплює рецензовані наукові статті, обсерваційні дослідження та клінічні випробування. Результати аналізу показали, що застосування роботизованих методів досягає покращення функціональних показників: швидкості, витривалості та рівня незалежності, що підтверджується тестами: 6MWT, 10MWT та WISCI II. Наукова новизна огляду полягає в порівняльному аналізі автономних та комбінованих роботизованих методів. Практична значущість роботи полягає у можливості використання отриманих висновків фізичними терапевтами для оптимізації стратегії реабілітації ходьби, а також вибору найбільш доцільних роботизованих засобів для впровадження в клінічну практику.

Ключові слова: роботизовані методи реабілітації, неповне ушкодження спинного мозку (iSCI), моторне відновлення, реабілітація ТСМ, оцінка ходьби.

<https://doi.org/10.31891/pcs.2025.2.13>

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сьогодні, неповна травма спинного мозку – це надзвичайно поширена форма неврологічних ушкоджень, що характеризується порушенням рухової активності, ускладненням процесу адаптації до соціуму та зниженням якості життя пацієнтів.

Відновлення здатності до незалежного переміщення розглядається, як один із ключових напрямів всієї фізичної терапії. Потрібно не забувати про те, що застосування традиційних методів відновлення ходьби після перенесеної травми спинного мозку має суттєві обмеження: низька мотивація наслідок монотонності процесу відновлення,

обмежена ефективність реабілітаційного процесу, некерована інтенсивність фізичного навантаження, а також нестабільна динаміка відновлення ходьби [1].

Загалом, роботизовані методи реабілітації розглядаються як перспективний напрям, що забезпечує контрольовану підтримку нижніх кінцівок, відтворення фізіологічних рухів із чітким дозуванням фізичного навантаження та стандартизованими параметрами відновлювального впливу. При застосуванні даних методів, спостерігається підвищення мотивації пацієнтів до подальших занять, тому, що забезпечує оптимальну відповідність між навантаженням і рівнем втоми. Крім того, роботизовані методи терапії характеризуються зменшеною до мінімуму монотонністю занять та вищою залученістю пацієнта, що знижує негативні емоції та

тривожності, пов'язаної з очікуванням складностей, що супроводжують пацієнтів з травмою спинного мозку на усіх кроках [1, 8].

Всупереч загально поширеному впровадженню роботизованих методів відновлення ходьби в провідних країнах світу, питання об'єктивного оцінювання їх клінічної ефективності залишається недостатньо вивченим, що зумовлює необхідність подальших наукових досліджень у цьому напрямі.

Фізична терапія пацієнтів після перенесеної неповної травми спинного мозку є складним та багатограним процесом, оскільки навіть незначні структурні ушкодження спинного мозку істотно впливають на надзвичайно важливі аспекти фізичної терапії — мобільність, рівень функціональної незалежності та здатність до соціальної реінтеграції пацієнта. На жаль, застосування традиційних підходів у фізичній терапії без використання роботизованих технологій часто супроводжується надмірним фізичним навантаженням як для пацієнта, так і для фахівця, що у реальних умовах клінічної практики значно ускладнює забезпечення позитивної динаміки та результату. Невідповідність навантаження функціональним можливостям пацієнта призводить до затягування термінів відновлення, а також сприяє виникненню монотонності у відновлювальному процесі, що знижує будь-яку мотивацію до занять і, як наслідок ефективність занять мінімальна. На сьогодні роботизовані методи реабілітації демонструють потенціал у подоланні труднощів, з якими регулярно стикаються фізичні терапевти на практиці. Проте, для їх повноцінного впровадження у клінічну практику необхідні подальші дослідження, спрямовані на обґрунтування ефективності та розробку оптимальних протоколів застосування.

2. ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Мета дослідження – систематично проаналізувати та оцінити ефективність використання роботизованих методів відновлення ходьби у пацієнтів після перенесеної неповної травми спинного мозку; визначити оптимальні умови застосування представлених методів; оцінити вплив методів на важливі поняття у процесі фізичної терапії як: швидкість, витривалість, рівень

рухової незалежності, а також окреслити перспективи подальшого клінічного впровадження.

Методологія дослідження

Дана оглядова стаття сформована на аналізі рецензованих досліджень, щодо застосування роботизованих методів у реабілітації ходьби пацієнтів з неповною травмою спинного мозку. Використано описовий огляд літератури для узагальнення даних і оцінки ефективності роботизованих методів.

Інформація зібрана через систематичний пошук у базах PubMed Central, SAGE Journals, Nature Journals, Frontiers і ResearchGate. Аналіз охоплює публікації 2017–2024 років, що відповідає сучасним науковим тенденціям.

Критерії включення досліджень

До аналізу включалися дослідження з відповідними критеріями:

1. Дослідження з використанням роботизованих методів реабілітації ходьби пацієнтів після перенесеної травми спинного мозку.

2. Дослідження з присутньою чіткою методологією та оцінкою ефективності впливу роботизованих методів відновлення ходьби.

3. Рандомізовані контрольовані, когортні та пілотні дослідження.

4. Дослідження, які опубліковані англійською мовою.

5. Дослідження з об'єктивними інструментами оцінки швидкості, витривалості та індексу незалежного переміщення (WISCI II, 6MWT, 10MWT).

Критерії виключення досліджень

1. Дослідження без контрольної групи або без стандартизованих методик оцінки ходьби.

2. Експерименти на тваринах або дослідження, що базувались лише на теорії чи моделюванні.

3. Дослідження, які не стосуються роботизованих методів відновлення ходьби після неповної травми спинного мозку.

4. Публікації, які нереконструовані або з нечіткою методикою.

Метод відбору даних

Процес відбору статей включав три основні етапи:

1. Аналіз – перегляд заголовків і анотацій для оцінки відповідності тематиці оглядової статті.

2. Детальне вивчення тексту – аналіз повних текстів відібраних статей для визначення їхньої релевантності.

3. Формування вибірки – включення статей, які відповідали встановленим критеріям, у кінцевий аналіз.

4. Всього було відібрано 13 досліджень, які класифікувалися за методом: 4 використовували HAL; 2 – Morning Walk; 2 – Lokomat і по 1 дослідженню з такими методами: Lokomat Pro Paediatric Version; Ekso GT; HANK; Ekso; REARS; SuitX Phoenix;

Статистичний аналіз

Кількісний аналіз не проводився, через оглядовий характер. Ефективність роботизованих методів реабілітації ходьби оцінювався за якісним аналізом і порівнянням ключових параметрів у відібраних публікаціях.

Для загальної оцінки впливу екзоскелетів використовували валідні показники функціонального стану після неповної травми спинного мозку: 6MWT, 10MWT, WISCI II. В усіх наведених дослідженнях у таблиці 1 усі валідні показники наявні. Усі дані зведені у таблицю 1.

Таблиця 1.

Результати досліджень застосування роботизованих методів

№	Автори, рік	Роботизований метод	Класифікація травми	Короткий огляд результатів
1.	Ting-Ting Ma et al., 2022 [1]	Lokomat Pro Paediatric Version	Incomplete SCI	Покращення швидкості і витривалості. Зросла самостійність ходьби.
2.	Dylan J. Edwards et al., 2022 [2]	Ekso GT	Incomplete SCI	Не статистично значуще покращення.
3.	Amrei Zierjacks et al., 2021 [3]	HAL	Incomplete SCI	Значне покращення: швидкості, витривалості, незалежності ходьби.
4.	Ángel Gil-Agudo et al., 2023 [4]	HANK	Incomplete SCI	Значуще покращення незалежності. Покращення швидкості та витривалості.
5.	Mirko Aach et al., 2023 [5]	HAL	Incomplete SCI	Значне покращення витривалості, швидкості та незалежності.
6.	Ji Cheol Shin et al., 2023 [6]	End-effector robot та Morning Walk	Incomplete SCI	Покращення швидкості і витривалості із значним покращенням незалежності ходьби.
7.	Giulia Stampacchia et al., 2020 [7]	1. Ekso і FES 2. Lokomat і FES-OG	Incomplete SCI	1. Адаптація до методу. 2. Покращення всіх показників.
8.	Anupam Gupta et al., 2022 [8]	REARS	Incomplete SCI	Покращення показників двох груп.
9.	Alexis Brinkemper et al., 2021 [9]	HAL	Incomplete SCI	Значне покращення швидкості та витривалості. Загальне покращення незалежності.
10.	Paul Aarne Koljonen et al., 2021 [10]	SuitX Phoenix	Incomplete SCI	Покращення всіх показників.
11.	Ji Cheol Shin et al., 2021 [11]	End-effector robot та Morning Walk	Incomplete SCI	Суттєве покращення незалежності ходьби, витривалості та швидкості.
12.	Oliver Jansen et al., 2017 [12]	HAL	Incomplete SCI	Покращення незалежності та суттєві зміни швидкості та витривалості.
13.	Natalia Comino-Suárez et al., 2025 [13]	Lokomat + tSCS	Incomplete SCI	Значне покращення швидкості та незалежності.

3. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ З ПОВНИМ ОБГРУНТУВАННЯМ ОТРИМАНИХ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Травма спинного мозку (SCI) – це неврологічне пошкодження, що характеризується руховим, сенсорним та вегетативним порушенням функцій.

Причинами є травматичні події (наприклад ДТП) або нетравматичні захворювання (наприклад недоброякісні новоутворення). Травми спинного мозку класифікують на повну травму (complete SCI) та неповну травму відповідно (incomplete SCI).

Повна травма спинного мозку (cSCI) характеризується повною втратою моторної та сенсорної функції нижче рівня ураження. Дана травма, практично, унеможлиблює досягнення функціональної незалежності та відновлення. Натомість неповна травма спинного мозку (iSCI) характеризується частковим збереженням сенсорних і моторних функцій нижче рівня ураження. На відміну від повної травми, неповна все ж має перспективні передумови для досягнення значущого результату — відновлення незалежності та функціональної мобільності.

Роботизовані методи відновлення ходьби – це важлива ланка у процесі фізичної терапії пацієнтів після перенесеної травми спинного мозку, сприяючи процесу відновленню швидкості, витривалості та незалежності ходи пацієнта. Основна мета – покращення вище перерахованих показників, як результат пришвидшуючи реінтеграцію пацієнта. На сьогодні, поширеними методами є екзоскелети (Ekso GT, HAL) та енд-ефекторний метод (Lokomat). Дані методи забезпечують механічну підтримку ваги тіла та корекцію рухів нижніх кінцівок (рухи пацієнта набувають ознак природності). Механічна підтримка серйозно спрощує фізичне навантаження на терапевта. Проаналізовані дослідження показали позитивний вплив на швидкість та витривалість через повторюваність рухів і активацію нейропластичних процесів головного мозку [16, 17].

Ефективність методів визначається за допомогою валідних тестів. Шкала WISCI-II визначає рівень самостійної ходьби, допоміжних засобів і підтримки, яка потрібна для пацієнта. WISCI-II визнана надійним інструментом для оцінки змін стану пацієнтів. Наступні тести 10-метровий тест (10MWT) і 6-хвилинний тести ходьби (6MWT) визначають швидкість і витривалість пересування, відповідно. Їх валідність підтверджена, щоб оцінити результат впливу роботизованих методів [14, 15].

Роботизовані методи отримали ключову роль у відновленні ходьби після iSCI, через позитивний вплив на незалежність пересування, швидкість і витривалість. Методи формують повністю контрольоване середовище тренування навички переміщення. Саме повторювані рухи сприяють відновленню нейронних зв'язків.

Важливими моментами є те, що роботизовані методи коригують у пацієнта рухові відхилення, оптимізуючи патерни ходьби, посилюючи сенсомоторний зворотний зв'язок – покращуючи активність сенсомоторної кори. Крім того, вона зменшує фізичне та психологічне навантаження на фізичних терапевтів, забезпечуючи можливість використати на 100% можливості пацієнта [16, 17].

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Роботизовані методи це перспективна сфера. Відібрані методи демонструють позитивні результати у різних вікових груп. Наприклад, у дітей з неповною травмою грудно-поперекового відділу спинного мозку, застосування системи Lokomat суттєво покращило швидкість, витривалість та рівень незалежності ходьби, але з частковим зниженням після припинення занять. Результат впливу екзоскелета Ekso неоднозначний. Тому, що спостерігалось статистично не значуще покращення результатів. Наступне дослідження з екзоскелетом HAL показало суттєве покращення 10MWT і WISCI II у пацієнтів з гострою та хронічною травмою. Для порівняння, група гострого періоду отримали масштабніше покращення витривалості за 6MWT [1, 2, 3].

Екзоскелети

У фізичній терапії екзоскелети демонструють потенціал для покращення витривалості, швидкості та незалежності ходьби. Проаналізовані клінічні дослідження підтверджують ефективність цих методів.

Ekso GT використаний у дослідженні Dylan J. Edwards et al., 2022 [2], після 12 тижнів тренувань, у пацієнтів з хронічним iSCI, спостерігалось індивідуальне покращення результатів швидкості та витривалості. У даному дослідженні найдоречніше звернути увагу на покращені 10MWT, 6MWT.

Терапія з HAL, показала доречніші результати. Тому, що результат значущий для хронічної, та для гострої групи пацієнтів по всіх параметрах. Потрібно зазначити, прогрес був потужніший у гострій групі втручання [3].

У дослідженні екзоскелета HANK після процесу реабілітації пацієнтів з iSCI показало статистично значуще покращення за WISCI-

II, який склав 3,5 бала. Наступні результати також показали покращення швидкості та витривалості ходьби, але якщо порівнюючи з прогресом самостійності ходьби воно було менш виражене [4].

Дослідження HAL у гострій фазі SCI на 50 пацієнтах підтвердило ефективність впливу на процес відновлення ходьби за усіма вище згадуваними тестами: 10MWT, 6MWT, WISCI-II. Проте слід виділити, що прогрес індексу самостійності найрезультативніший серед інших результатів [5].

Екзоскелет REARS також сприяв позитивній динаміці. Даний результат досягнутий в обох групах: G1 (без початкової здатності ходити) та G2 (з певною здатністю до ходьби). Результат показав, що екзоскелет REARS – це хороший метод для відновлення ходьби, при відсутності здатності до ходьби [8].

В цілому використання екзоскелета HAL показало позитивну динаміку ефективності тренувань. Дані заняття найбільш були ефективні для пацієнтів з хронічною фазою травми, ніж для гострої. З даного дослідження потрібно виділити приріст показників швидкості та витривалості [9].

Екзоскелет SuitX Phoenix забезпечував комфортний та ефективний реабілітаційний процес для пацієнтів з неповним ураженням від T4 до L5. Результати виділили значне покращення показників швидкості, витривалості та незалежності. Дане дослідження показало позитивний результат за умови: нищого рівня ураження та неповної травми спинного мозку [10].

Отже, підсумовуючи вище вказані результати, екзоскелети є ефективним засобом для ранньої та пізньої реабілітації при iSCI. Результати варіюються залежно від типу пристрою, стадії ураження та функціонального рівня пацієнта. Безумовно досягається позитивна динаміка у швидкості, витривалості та незалежності ходьби пацієнта.

Енд-ефекторні методи

Дані роботизовані методи реабілітації ходьби є також ефективними для пацієнтів з неповною травмою спинного мозку (iSCI). Такі методи забезпечують вільні рухи у суглобах та стандартизації тренувального процесу в цілому. В цілому даний метод активує нейропластичність, покращуючи пропріоцепцію пацієнта.

У дослідженні Ji Cheol Shin et al., 2021 [11] після 20 сеансів з Morning Walk® пацієнти з iSCI продемонстрували покращення за всіма показниками: 10MWT — до 0,16 м/с, 6MWT — 52 м, WISCI-II — з 3 до 13 балів. Загалом не один показник не відстав, що показує гармонійний вплив даного методу на процес реабілітації.

Рандомізоване дослідження Ji Cheol Shin et al., 2023 [6] показало, що енд-ефекторний метод перевершує традиційну терапію. Так, наприклад, покращення швидкості до 0,2 м/с., та витривалості до 54 метрів стало клінічно значущим результатом дослідження. На противагу швидкості та витривалості, покращення самостійності ходьби за WISCI-II стало статистично значущим. Загалом використання даного методу відносимо до ефективних методів, які особливо високо себе проявляють з пацієнтами з початково низькими можливостями пересування.

Ting-Ting Ma et al., 2022 [1] оцінили ефективність Lokomat Pro Pediatric у дітей з iSCI. За 8 тижнів терапії, швидкість ходьби зросла до 0.60 м/с., витривалість — до 162 метрів, також на два бали збільшився індекс незалежності переміщення. В загальному даний метод чудово себе проявив з метою відновлення ходьби. Особливу увагу потрібно приділити – довготривалому ефекту (через місяць показники мінімально змінилися).

Підсумовуючи, системи Morning Walk® та Lokomat Pro демонструють гармонійно-високу ефективність у відновленні ходьби при iSCI. Вони покращують швидкість, витривалість і незалежність ходьби. Застосування є доцільним на різних фазах травми та вікових групах, яке відповідно матиме довготривалий ефект.

Комбіновані методи

Дані методи, які супроводжуються нейромодуляцією або фізичною стимуляцією, також, висвітлюють ефективні результати у відновленні ходьби. Аналіз трьох досліджень підтверджує позитивну динаміку комбінованого методу.

Дослідження Giulia Stampacchia et al., 2020 [7], показало, що комбінація Lokomat та FES-OG є найбільш ефективною. Швидкість зросла до 19 секунд; витривалість зросла на 71 метр і відповідно індекс незалежності підвищився на 8 балів. Але даний позитивний ефект завдячується певній збереженій моторній функції до процесу реабілітації. За

умови LEMS <10, результат буде невтішним (буде спостерігатися адаптація до методу). На ефективність відновлення значно впливає наявна збережена певна моторна функція.

У довготривалому дослідженні Oliver Jansen et al., 2017 [12] встановлено, що регулярне застосування екзоскелету HAL у пацієнтів із хронічною SCI дозволяє досягти значного приросту: 10MWT, 6MWT, WISCI-II. У даному дослідженні потрібно звернути увагу на довготривалість ефекту. Так, результат зберігається протягом 1 року, за умови різної частоти тренувань. Проте за потреби покращення результату, потрібна систематизація тренувань. Це свідчить про стійкий ефект терапії та потребу удосконалення.

Рандомізоване контрольоване дослідження Natalia Comino-Suárez et al., 2025 [13], де поєднувалося роботизоване тренування з трансшкірною стимуляцією спинного мозку (tSCS) продемонструвало переваги над імітаційною стимуляцією. Статистично значуще покращення спостерігалось у показниках: швидкості та незалежності. Наприклад, за шкалою WISCI-II показник незалежності виріс на 5 балів. На додаток, даний метод має довготривалий ефект, що в процесі реабілітації важливо.

Отже, комбіновані методи мають переваги. До переваг віднесемо: гармонійний вплив, довготривалий ефект. Але все ж результат залежний від умов використання. Наприклад за відсутності залишкової моторної функції є ризик не отримати бажаний результат. Потрібно не забувати, що комбіновані методи містять важливу особливість – здатність активувати додаткові нейрофізіологічні механізми відновлення завдяки впливу на центральні й периферичні компоненти нервової системи. Застосування даної стратегії перспективне.

Прогалини в наявних дослідженнях та необхідність подальших досліджень

Попри позитивні результати досліджень, у сфері роботизованої реабілітації, залишаються кілька ключових обмежень.

1. Більшість досліджень мають малу вибірку пацієнтів, що знижує статистичну силу висновків та ускладнює узагальнення результатів [1, 4, 8].

2. Спостерігається відсутність уніфікованих підходів до оцінки ефективності: застосовуються різні шкали

(LEMS, TUG, BBS), що ускладнює порівняння [5, 6, 10].

3. Довгострокова ефективність впливу досліджена недостатньо: публікації фокусується на коротких проміжках впливу, при чому в більшості досліджень відсутнє системне спостереження за результатом через 6–12 місяців [1, 7, 9].

Дані прогалини вказують на потребу подальших рандомізованих досліджень із великими вибірками, уніфікованими підходами оцінки та тривалим періодом спостереження результатів реабілітації.

Результати дослідження

Аналіз досліджень показав високу ефективність методів. У дослідженнях із використанням екзоскелетів (HAL, Ekso, HANK, REARS, SuitX Phoenix) спостерігається покращення показників швидкості, витривалості та незалежності пересування. З усіх екзоскелетів саме HAL продемонстрував виразні результати, гострої фази [3].

Енд-ефекторні пристрої, зокрема Morning Walk® та Lokomat, також позитивно вплинули на всі ключові параметри ходьби, показавши гармонійне покращення навіть у пацієнтів з низькими початковими можливостями. Проте, найкращі результати спостерігались при комбінованих підходах: поєднання роботизованої терапії з функціональною електростимуляцією. Даний метод досягає значущого зростання незалежності (за шкалою WISCI-II) та швидкості ходьби. Наявність довготривалого ефекту вказує на важливий потенціал. Загалом, використання роботизованих методів відкриває нові перспективи та можливості для ефективного відновлення ходьби при іSCI, особливо при індивідуалізованому підході.

Вплив на методи оцінки

Роботизовані методи демонструють суттєве покращення швидкості та витривалості ходьби. Покращення простежуються за шкалами 10MWT та 6MWT. Наприклад, після восьми-тижневого курсу із застосуванням Lokomat Pro Pediatric у дітей із неповним ураженням було зафіксовано приріст швидкості ходьби на 58% і витривалості — на 55% [1]. Подібні результати спостерігались при використанні екзоскелета HAL®, де після 60 сесій тренування середній час проходження

10MWT покращився на 58%, а дистанція у 6MWT зросла на 72% [5]. Водночас у пацієнтів, які проходили реабілітацію на енд-ефекторному пристрої Morning Walk®, швидкість ходьби за 10MWT зросла до 0,16 м/с, а витривалість за 6MWT — до 52 метрів. Результати досягнуті за умови повної відсутності можливості виконати ці тести пацієнтами, до процесу реабілітації [11].

Дані методи значуще впливають на індекс незалежності. Після восьми-тижневого курсу з використанням роботизованого пристрою Lokomat Pro у дітей з іSCI показник WISCI-II покращився на 17% в порівнянні з контрольною групою [1]. У дослідженні Ángel Gil-Agudo et al., 2023 [4], після 15 сеансів з екзоскелетом HANK, приріст індексу WISCI-II становив 42%, що суттєво перевищувало результати контрольної групи. Також значне покращення незалежності було зафіксоване при використанні HAL®, де 44 із 50 пацієнтів збільшили свої показники WISCI-II на 90% [5].

Порівняння результатів роботизованих методів з традиційними

У порівнянні з традиційними методами, роботизовані демонструють вищу ефективність по всіх параметрах. У дослідженні Ting-Ting Ma et al., 2022 [1], група, що використовувала Lokomat, покращила швидкість ходьби на 58%, витривалість — на 55%, у той час як контрольна група показала мінімальні зміни. У дослідженні з використанням екзоскелета Ekso GT було доведено, що 56% учасників змогли змінити категорію мобільності за WISCI-II, тоді як у контрольній групі цей показник становив лише 30% Paul Aarne Koljonen et al., 2021 [10]. Додатково, в роботизованій групі, що використовувала Morning Walk®, приріст у WISCI-II після 4 тижнів тренування становив 9.5 бала, що перевищило результати звичайної терапії більш ніж у 4 рази Ji Cheol Shin et al., 2023 [6]. Таблиця 2 узагальнює основні результати досліджень:

Таблиця 2.

Основні результати

№	Автори, рік	Методи	Вибірка (n)	Основні результати (10MWT; 6MWT; WISCI II)
1.	Ting-Ting Ma et al., 2022 [1]	Енд-ефекторні пристрої	21	58%; 55%; 17%
2.	Dylan J. Edwards et al., 2022 [2]	Екзоскелети	25	51%; 34%; 0 %
3.	Amrei Zierjacks et al., 2021 [3]	Екзоскелети	121	92%; 60%; 43%
4.	Ángel Gil-Agudo et al., 2023 [4]	Екзоскелети	23	67%; 60%; 42%
5.	Mirko Aach et al., 2023 [5]	Екзоскелети	50	58%; 72%; 90%
6.	Ji Cheol Shin et al., 2023 [6]	Енд-ефекторні пристрої	31	3 0 м/с до 0.2 м/с 3 0 м до 54 м 271%
7.	Giulia Stampacchia et al., 2020 [7]	Комбінований	52	30%; 58%; 100%
8.	Anupam Gupta et al., 2022 [8]	Екзоскелети	7	Група (G1): з 0 до 0.2 м/с; з 0 до 66 м.; 226%. Група (G2): 16%; 17%; 0%.
9.	Alexis Brinkemper et al., 2021 [9]	Екзоскелети	15	44%; 38%; 17%
10.	Paul Aarne Koljonen et al., 2021 [10]	Екзоскелети	40	50%; 58%; 23%
11.	Ji Cheol Shin et al., 2021 [11]	Енд-ефекторні пристрої	13	3 0 м/с до 0.16 м/с. 3 0 м до 52 м. 3 3 до 13 балів.
12.	Oliver Jansen et al., 2017 [12]	Комбінований	8	78%; 132%; 11%
13.	Natalia Comino-Suárez et al., 2025 [13]	Комбінований	27	55%; 375%; 125%

Основні результати для обчислення результату покращення проводились за формулою:

$$\text{Покращення}\% = \left(\frac{\text{До VR} - \text{Після VR}}{\text{До VR}} \right) \times 100\%$$

В дослідженнях де неможливо визначити відсоткове покращення було використано спосіб – «Абсолютної зміни». Тому, що деякі методи були використані на пацієнтах з нульовими показниками швидкості, витривалості та незалежності переміщення. З цього виходить, що спосіб «Абсолютної зміни», в такому випадку найзрозуміліший і математично правильний.

Обговорення

Аналіз сучасних досліджень свідчить про безсумнівну ефективність підходу. Всі клінічні випробування сприяли покращенню результатів. Проте слід врахувати випадки індивідуального покращення без статистично значущого результату [10].

Порівняння результатів досліджень показує, що ефективність втручання значною мірою залежить від типу пристрою; стадії ураження; початкового функціонального рівня. Наприклад, енд-ефекторні методи результативні на ранніх етапах відновлення, тоді як екзоскелети демонструють кращу динаміку у хронічних випадках. Найвищі показники досягаються при використанні комбінованих підходів — поєднання роботизованої терапії з функціональною електростимуляцією (FES) або трансшкірною стимуляцією спинного мозку (tSCS) [6, 13].

Порівняння з іншими дослідженнями

Результати Ting-Ting Ma et al., 2022 [1] підтверджують високу ефективність роботизованої терапії у педіатричних пацієнтів з іSCI: після восьмижневого курсу RAGT з Lokomat діти продемонстрували статистично значне покращення швидкості, витривалості та м'язової сили. Подібні результати були отримані у дослідженні Ji Cheol Shin et al., 2021 [11], де пацієнти, які проходили тренування з енд-ефекторною системою Morning Walk®, мали вищі показники (наприклад WISCI-II) порівняно з контрольною групою. Натомість дослідження Dylan J. Edwards et al., 2022 [2] на противагу Amrei Zierjacks et al., 2021 [3] продемонстрували, що хоча екзоскелетна терапія забезпечує покращення, інколи ці покращення не завжди є статистично значущими, що може бути пов'язано з меншою пластичністю нервової системи у когорті пацієнтів з хронічною фазою.

Практичне значення та перспективи

Отримані результати демонструють, що роботизовані методи реабілітації ходьби є

перспективним інструментом на різних етапах відновлення після неповної травми спинного мозку. Екзоскелети (HAL, Ekso, REARS) та енд-ефекторні пристрої (Morning Walk®, Lokomat) сприяють покращенню швидкості, витривалості та рівня незалежності у переміщенні. Всі вище зазначені методи мають серйозний недолік — доступність таких технологій (особливо у воєнний час в Україні). Висока вартість ускладнює впровадження роботизованого методу відновлення ходьби у сучасну українську реабілітацію. В такому випадку чудовим виходом буде використання альтернативи — легких та мобільних пристроїв: SuitX Phoenix.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на:

1. Розширення вибірки для підвищення надійності результатів.
2. Вивчення довготривалого ефекту методів після завершення терапії.
3. Стандартизацію тренування та методів оцінки для порівняння ефективності.

5. ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМКУ

Використання роботизованих технологій у реабілітації ходьби має майбутнє. У цьому дослідженні було виявлено, що ефективність роботизованої терапії залежить від типу методу; стадії ураження; початкового функціонального рівня пацієнта. Найбільш виражені результати спостерігаються при використанні комбінованого методу відновлення ходьби.

Перевагою роботизованих методів є здатність забезпечити повторювану та контрольовану стимуляцію рухів. Дані методи активують механізми нейропластичності та сприяє відновленню природного патерну ходьби. Деякі пристрої, як-от Morning Walk® та HAL, також демонструють позитивний вплив на пропріоцепцію, тобто забезпечують зворотний зв'язок.

Недоліком роботизованої реабілітації є висока вартість, потреба в спеціалізованому персоналу та обмежена доступність у медичних закладах України.

Перспективним застосування найбільш ефективних – комбінованих методів та більш

мобільних екзоскелетів (SuitX Phoenix), які можуть забезпечити доступну та водночас ефективну реабілітацію ходьби. В час війни, окрему увагу слід приділити педіатричній популяції, де використання енд-ефекторних систем показало високу ефективність і безпечність (Lokomat Pro Paediatric Version).

5. СКОРОЧЕННЯ

1. iSCI – Incomplete Spinal Cord Injury (неповне ушкодження спинного мозку).

2. RAGT – Robot-Assisted Gait Training (роботизоване тренування ходьби).

3. HAL – Hybrid Assistive Limb (гібридна допоміжна система).

4. LEMS – Lower Extremity Motor Score (оцінка моторної функції ниж. кінцівок).

5. WISCI-II – Walking Index for Spinal Cord Injury II (індекс ходьби при травмі спинного мозку, версія II).

6. 6MWT – Six-Minute Walk Test (шестихвилинний тест ходьби).

7. 10MWT – Ten-Meter Walk Test (десятиметровий тест ходьби).

8. BBS – Berg Balance Scale (шкала рівноваги Берга).

9. TUG – Timed Up and Go Test (тест «Встань і йди»).

10. FES – Functional Electrical Stimulation (функціональна електростимуляція).

11. tSCS – Transcutaneous Spinal Cord Stimulation (траншкірна стимуляція спинного мозку).

References

1. Ma T.-T. Effects of robotic-assisted gait training on motor function and walking ability in children with thoracolumbar incomplete spinal cord injury // *NeuroRehabilitation*. – 2022. – Т. 51, № 3. – С. 499–508. – DOI: 10.3233/NRE-220124.

2. Edwards D.J., Forrest G., Cortes M., Weightman M.M., Sadowsky C., Chang S.-H., Furman K., Bialek A., Prokup S., Carlow J., VanHiel L., Kemp L., Musick D., Campo M., Jayaraman A. Walking improvement in chronic incomplete spinal cord injury with exoskeleton robotic training (WISE): a randomized controlled trial // *Spinal Cord*. – 2022. – Vol. 60, No. 6. – P. 522–532. – DOI: 10.1038/s41393-022-00751-8.

3. Zierjacks A., Aach M., Brinkemper A., Koller D., Schildhauer T.A., Grasmücke D. Rehabilitation of acute vs. chronic patients with spinal cord injury with a neurologically controlled hybrid assistive limb exoskeleton: is there a difference in outcome? // *Frontiers in NeuroRobotics*. – 2021. – Vol. 15. – Article 728327. – DOI: 10.3389/fnbot.2021.728327.

4. Gil-Agudo Á., Megía-García Á., Pons J.L., Sinovas-Alonso I., Comino-Suárez N., Lozano-Berrio V., Del-Ama A.J. Exoskeleton-based training improves walking independence in incomplete spinal cord injury patients: results from a randomized controlled trial // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2023. – Vol. 20, No. 1. – Article 36. – DOI: 10.1186/s12984-023-01158-z.

5. Aach M., Schildhauer T.A., Zierjacks A., Jansen O., Weßling M., Brinkemper A., Grasmücke D. Feasibility, safety, and functional outcomes using the neurological controlled Hybrid Assistive Limb exoskeleton (HAL®) following acute incomplete and complete spinal cord injury – results of 50 patients // *The Journal of Spinal Cord Medicine*. – 2023. – Vol. 46, No. 4. – P. 574–581. – DOI: 10.1080/10790268.2023.2200362.

6. Shin J.C., Jeon H.R., Kim D., Min W.K., Lee J.S., Choe S.I., Oh D.S., Yoo J. Effects of end-effector robot-assisted gait training on gait ability, muscle strength, and balance in patients with spinal cord injury // *NeuroRehabilitation*. – 2023. – Vol. 53, No. 3. – P. 335–346. – DOI: 10.3233/NRE-230085.

7. Stampacchia G., Olivieri M., Rustici A., D'Avino C., Gerini A., Mazzoleni S. Gait rehabilitation in persons with spinal cord injury using innovative technologies: an observational study // *Spinal Cord*. – 2020. – Vol. 58. – P. 988–997. – DOI: 10.1038/s41393-020-0454-2.

8. Gupta A., Prakash N.B., Honavar P.R. Gait training with robotic exoskeleton assisted rehabilitation system in patients with incomplete traumatic and non-traumatic spinal cord injury: a pilot study and review of literature // *Annals of Indian Academy of Neurology*. – 2023. – Vol. 26, Suppl. №1. – P. S26–S31. – DOI: 10.4103/aian.aian_1075_21.

9. Brinkemper A., Aach M., Grasmücke D., Jettkant B., Rosteius T., Dudda M., Yilmaz E., Schildhauer T.A. Improved physiological gait in acute and chronic SCI patients after training with wearable cyborg Hybrid Assistive Limb // *Frontiers in NeuroRobotics*. – 2021. – Vol. 15. – Article 723206. – DOI: 10.3389/fnbot.2021.723206.

10. Koljonen P.A., Virk A.S., Jeong Y., McKinley M., Latorre J., Caballero A., Hu Y., Wong Y.W., Cheung K., Kazerooni H. Outcomes of a multicenter safety and efficacy study of the SuitX Phoenix powered exoskeleton for ambulation by patients with spinal cord injury // *Frontiers in Neurology*. – 2021. – Vol. 12. – Article 689751. – DOI: 10.3389/fneur.2021.689751.

11. Shin J.C., Jeon H.R., Kim D., Cho S.I., Min W.K., Lee J.S., Oh D.S., Yoo J. Effects on the motor function, proprioception, balance, and gait ability of the end-effector robot-assisted gait training for spinal cord injury patients // *Brain Sciences*. – 2021. – Vol. 11, No. 10. – Article 1281. – DOI: 10.3390/brainsci11101281.

12. Jansen O., Schildhauer T.A., Meindl R.C., Tegenthoff M., Schwenkreis P., Sczesny-Kaiser M., Grasmücke D., Fisahn C., Aach M. Functional outcome of neurologic-controlled HAL-exoskeletal neurorehabilitation in chronic spinal cord injury: a pilot with one year treatment and variable treatment frequency // *Global Spine Journal*. – 2017. – Vol. 7, No. 8. – P. 735–743. – DOI: 10.1177/2192568217713754.

13. Comino-Suárez N., Moreno J.C., Megía-García Á., Del-Ama A.J., Serrano-Muñoz D., Avendaño-Coy J., Gil-Agudo Á., Alcobendas-Maestro M., López-López E., Gómez-Soriano J. Transcutaneous spinal cord stimulation combined with robotic-assisted body weight-supported treadmill training enhances motor score and gait recovery in incomplete spinal cord injury: a double-blind randomized controlled clinical trial // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2025. – Vol. 22, No. 1. – Article 15. – DOI: 10.1186/s12984-025-01545-8.

14. Marino R.J., Scivoletto G., Patrick M., Tamburella F., Read M.S., Burns A.S., Hauck W., Ditunno J. Walking index for spinal cord injury version 2 (WISCI-II) with repeatability of the 10-m walk time: inter- and intrarater reliabilities // *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. – 2010. – Vol. 89, No. 1. – P. 7–15. – DOI: 10.1097/PHM.0b013e3181c560eb.

15. Scivoletto G., Tamburella F., Laurenza L., Foti C., Ditunno J.F., Molinari M. Validity and reliability of the 10-m walk test and the 6-min walk test in spinal cord injury patients // *Spinal Cord*. – 2011. – Vol. 49, No. 6. – P. 736–740. – DOI: 10.1038/sc.2010.180.

16. Chang S.-H., Tseng S.-C., Su H., Francisco G.E. Editorial: how can wearable robotic and sensor technology advance neurorehabilitation? // *Frontiers in Neurorobotics*. – 2022. – Vol. 16. – Article 1033516. – DOI: 10.3389/fnbot.2022.1033516.

17. Hubli M., Dietz V. The physiological basis of neurorehabilitation – locomotor training after spinal cord injury // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2013. – Vol. 10. – Article 5. – DOI: 10.1186/1743-0003-10-5.

Abstract

NESTERCHUK Nataliia, KOVALCHUK Yurii

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

ROBOTIC GAIT REHABILITATION METHODS AFTER INCOMPLETE SPINAL CORD INJURY: A REVIEW OF RESEARCH

The use of robotic methods to restore walking after spinal cord injury is a promising area of modern rehabilitation that helps to improve patient independence.

This review article discusses the effectiveness of robotic methods of rehabilitation for patients with incomplete spinal cord injuries, their impact on walking recovery, and comparative characteristics of different methods.

The relevance of the article is due to the constant need to improve methods of functional recovery of patients with preserved motor activity. Robotic methods are an innovative approach that combines mechanical support with the potential of neuroplasticity. However, the question of the effectiveness of the intervention and the integration of these techniques into the practice of physical therapy remains open.

The aim of this study is to summarise current scientific data on the use of robotic methods for walking recovery after incomplete spinal cord injury, with a focus on the following impact indicators: speed, endurance and ability to move independently.

The study used a systematic review method that includes peer-reviewed scientific articles, observational studies, and clinical trials.

The results of the analysis showed that the use of robotic methods improves functional performance: speed, endurance and independence, as evidenced by tests: 6MWT, 10MWT and WISCI II.

The scientific novelty of the review is a comparative analysis of autonomous and combined robotic methods.

The practical significance of the work lies in the possibility of using the obtained conclusions by physical therapists to optimise the strategy of walking rehabilitation, as well as to select the most appropriate robotic means for implementation in clinical practice.

Key words: *robotic rehabilitation methods, incomplete spinal cord injury (iSCI), motor recovery, rehabilitation of the TSM, walking assessment.*

Стаття надійшла до редакції / Received 11.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 17.06.2025