

С. В. Павлов
Ю. О. Пилипець

ВИКОРИСТАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ У ТЕЛЕМЕДИЧНІЙ РЕАБІЛІТАЦІЇ ПАЦІЄНТІВ ІЗ ПОЛІТРАВМАМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація.

Інтеграція робототехнічних систем у телемедичну реабілітацію стала революційним підходом до поліпшення результатів відновлення пацієнтів із множинними травмами. Традиційні методи реабілітації часто вимагають тривалої госпіталізації та безпосереднього нагляду, що може обмежувати доступність і безперервність лікування. Використання телемедицини в поєднанні з робототехнічними технологіями дозволяє подолати ці обмеження, забезпечуючи дистанційний моніторинг у режимі реального часу та адаптивну реабілітацію під професійним наглядом.

Інтелектуальні системи телереабілітації, що інтегрують роботизовані екзоскелети, датчики Інтернету речей (IoT) та алгоритми управління на основі штучного інтелекту (ШІ) дозволяють лікарям дистанційно відстежувати біомеханічні параметри, такі як рух суглобів, активація м'язів та розподіл навантаження, а моделі ШІ аналізують ці дані для динамічного регулювання інтенсивності терапії та траєкторій руху відповідно до функціонального стану пацієнта.

Ключові слова: IoT, телемедицина, роботизована реабілітація, штучний інтелект, політравма, дистанційний моніторинг, адаптивне управління, пацієнт-орієнтована допомога, технології в охороні здоров'я.

Вступ. Реабілітація після множинних травм представляє значні клінічні та логістичні виклики через складність травм і тривалий процес відновлення. Традиційні методи реабілітації часто вимагають постійного особистого нагляду та доступу до спеціалізованих закладів, що може бути обмежено географічними та економічними факторами. Інтеграція телемедицини та робототехнічних технологій пропонує нову парадигму для дистанційної реабілітації, орієнтованої на пацієнта. Роботизовані системи, оснащені датчиками та приводами, забезпечують точні, повторювані та контрольовані рухи, що сприяють відновленню рухових функцій, а телемедичні платформи дозволяють лікарям відстежувати прогрес та коригувати параметри терапії в режимі реального часу. У поєднанні зі штучним інтелектом та підключенням до Інтернету речей (IoT) ці системи можуть аналізувати дані пацієнтів, адаптуватися до індивідуальних потреб та оптимізувати результати лікування. Такі технологічні моделі реабілітації мають потенціал для поліпшення функціонального відновлення, доступності та безперервності догляду за пацієнтами з множинними травмами.

Мета дослідження. Дослідження використання роботизованих систем у телемедичній реабілітації пацієнтів із політравмами

Основні матеріали досліджень.

Технології роботизованої реабілітації стали невід'ємною частиною сучасної фізичної медицини, забезпечуючи точне і повторюване тренування, що сприяє відновленню функціональних можливостей. Ці системи зазвичай класифікуються на роботи на основі екзоскелету і роботи на основі кінцевого виконавчого механізму, обидва типи призначені для сприяння руху кінцівок і відновлення нервово-м'язової координації. Дослідження [1,4] підкреслюють, що роботизовані пристрої значно покращують відновлення рухових функцій, діапазон рухів та м'язову силу у пацієнтів, які проходять інтенсивну реабілітацію. Включення датчиків, приводів та адаптивних контролерів дозволяє роботизованим системам відстежувати біомеханічні дані та адаптувати інтенсивність вправ до функціональних можливостей пацієнта. Така адаптивність є особливо цінною у випадках політравм, коли різні типи травм вимагають індивідуального підходу до лікування.

Телемедицина доповнює роботизовану реабілітацію, забезпечуючи віддалене з'єднання між пацієнтами та лікарями, тим самим гарантуючи безперервність лікування поза межами лікарні. Існують платформи телереабілітації, що інтегрують роботизовані технології та технології змішаної реальності, продемонструвавши, що віддалений зворотний зв'язок та моніторинг покращують залученість та результати відновлення [5]. Завдяки безпечним телемедичним мережам лікарі можуть контролювати сеанси терапії, оцінювати дані датчиків у реальному часі та змінювати параметри лікування без необхідності особистих візитів. Ця можливість зменшує логістичні бар'єри, з якими стикаються пацієнти з політравмами, особливо ті, хто проживає в сільських або недостатньо забезпечених регіонах, та дозволяє вчасно втручатися під час відновлення.

Впровадження пристроїв Інтернету речей (IoT) та алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) ще більше розширює функціональність телемедичних робототехнічних систем. Датчики IoT збирають безперервні фізіологічні та кінематичні дані, такі як кути згину суглобів, тиск на кінцівки та м'язова активність, а аналітика на основі ШІ обробляє ці дані для розпізнавання закономірностей та автоматичної оптимізації налаштувань терапії. Системи на основі ШІ можуть динамічно регулювати траєкторії руху роботів та рівні опору на основі показників та втоми пацієнта[2]. Така адаптивність у реальному часі покращує точність та безпеку терапії, дозволяючи персоналізувати реабілітацію відповідно до кривої прогресу кожного пацієнта. Крім того, дані, зібрані за допомогою платформ IoT, становлять основу для прогнозних моделей, які можуть виявляти ризики ускладнень або плато терапії на ранній стадії процесу.

Пацієнти з політравмами становлять складну проблему для реабілітації, часто вимагаючи одночасного відновлення опорно-рухового апарату, нервової системи та функціональних систем. Роботизовані системи, оснащені моніторингом на основі штучного інтелекту, забезпечують структуровані програми реабілітації, які можуть бути спрямовані на конкретні рухові порушення, зберігаючи при цьому загальний баланс і координацію. Дослідження [3] продемонстрували ефективність роботизованих систем для терапії вдома під дистанційним наглядом, що є особливо актуальним для осіб з політравмами, які мають обмежену рухливість. Постійний дистанційний моніторинг даних датчиків дозволяє клініцистам оцінювати прогрес, коригувати параметри роботів та запобігати ускладненням, таким як скутість суглобів або атрофія м'язів. Такий рівень точності та контролю гарантує, що реабілітація залишається безпечною, послідовною та чутливою до змін стану пацієнта.

Незважаючи на свій клінічний потенціал, роботизовані системи телереабілітації стикаються з низкою перешкод на шляху до широкого впровадження. Висока вартість обладнання, необхідність надійних високошвидкісних комунікаційних мереж та відсутність стандартизованої підготовки медичного персоналу залишаються значними викликами [6]. Крім того, необхідно вирішити питання взаємодії між різними робототехнічними платформами та проблеми конфіденційності даних у рамках міжнародних систем телемедицини. Майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці економічно ефективних модульних робототехнічних систем, які безперешкодно інтегруються в існуючі інфраструктури телемедицини. Прогрес у галузі легких матеріалів, хмарних обчислень на основі штучного інтелекту та адаптивних алгоритмів управління, ймовірно, зробить ці системи більш доступними. Постійна еволюція робототехнічної телереабілітації є ключовим кроком на шляху до повністю персоналізованої, безперервної та заснованої на даних реабілітації пацієнтів, які одужують після множинних травм.

Висновки.

Інтеграція робототехнічних систем у телемедичну реабілітацію є значним прогресом у післятравматичному лікуванні. Завдяки поєднанню робототехніки, телемедицини та аналізу даних на основі штучного інтелекту реабілітація може стати більш адаптивною, ефективною та доступною для пацієнтів із множинними травматичними ушкодженнями. Використання інтелектуальних екзоскелетів та засобів дистанційного моніторингу дозволяє здійснювати постійну оцінку відновлення рухових функцій, скорочує час госпіталізації та сприяє незалежності пацієнтів. Хоча залишаються певні виклики, такі як вартість системи, інфраструктура та підготовка клініцистів, все більше доказів підтверджують практичну здійсненність та клінічну цінність цієї технології. Майбутні розробки повинні бути зосереджені на широкомасштабній валідації та створенні економічно ефективних, орієнтованих на пацієнта робототехнічних платформ для широкого клінічного застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Banyai, A. D., Brişan, L. Robotics in physical rehabilitation: A systematic review. Healthcare, 2024, Vol. 12, No. 17, p. 1720. MDPI. DOI: 10.3390/healthcare12171720.
2. Calabrò, R. S., Cacciola, A., Bertè, F., Naro, A., Russo, M. AI-driven telerehabilitation: Benefits and challenges of a digital approach. Digital Health Innovations, 2025, Vol. 6, No. 3, p. 62. MDPI. DOI: 10.3390/digitalhealth6030062.
3. Etxarri, A., Aquerreta, I., Pérez, J. Development of an upper-limb tele-rehabilitation home robotic system. University of Navarra Technical Reports, 2021. Режим доступу: <https://dadun.unav.edu/server/api/core/bitstreams/361d0c8b-59fc-441a-bc49-eeaf83adb1a2/content>.

4. Gherman, B., Stan, O., Mureşan, V. Robotic systems for hand rehabilitation — Past, present, and future trends. *Technologies*, 2025, Vol. 13, No. 1, p. 37. MDPI. DOI: 10.3390/technologies13010037.
5. Khan, M. M. R., Rahman, M. A., Al-Khatib, M. Investigating a telerehabilitation platform integrated with robotic and mixed reality technologies. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, 2025, Vol. 12, No. 1, p. e75907. Режим доступу: <https://rehab.jmir.org/2025/1/e75907>.
6. Rossetto, F., Proietti, T., Bianchi, M. Efficacy of telerehabilitation with digital and robotic tools for neuro-motor recovery: A systematic review. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 2024, Vol. 3, No. 12, p. 10924562. Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10924562>.

Павлов Сергій Володимирович – д. т.н., професор, Вінницький національний технічний університет, **e-mail:** : psv@vntu.edu.ua

Пилипець Юлія Олександрівна – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail:** : 00-24-043.stud@vntu.edu.ua

USE OF ROBOTIC SYSTEMS IN TELEMEDICAL REHABILITATION OF PATIENTS WITH MULTIPLE TRAUMAS

Abstract.

The integration of robotic systems into telemedicine rehabilitation has been a revolutionary approach to improving recovery outcomes for patients with multiple injuries. Traditional rehabilitation methods often require prolonged hospitalization and direct supervision, which can limit the accessibility and continuity of treatment. The use of telemedicine in combination with robotic technologies overcomes these limitations by providing real-time remote monitoring and adaptive rehabilitation under professional supervision.

Intelligent telerehabilitation systems that integrate robotic exoskeletons, Internet of Things (IoT) sensors, and artificial intelligence (AI)-based control algorithms allow physicians to remotely track biomechanical parameters such as joint movement, muscle activation, and load distribution, while AI models analyze this data to dynamically adjust therapy intensity and movement trajectories according to the patient's functional status.

Keywords: IoT, telemedicine, robotic rehabilitation, artificial intelligence, multiple trauma, remote monitoring, adaptive control, patient-centered care, healthcare technologies.

Pavlov Serhii - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, **e-mail:** psv@vntu.edu.ua

Pylypets Yuliia - postgraduate student, Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, **e-mail:** 00-24-043.stud@vntu.edu.ua