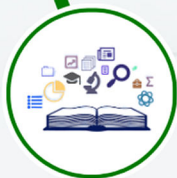




Наукові перспективи
Видавнича група

Перспективи та інновації науки



Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського

Видавнича група «Наукові перспективи»

Луганський державний медичний університет

Громадська наукова організація «Система здорового довголіття в мегаполісі»

Християнська академія педагогічних наук України

Всеукраїнська асоціація педагогів і психологів з духовно-морального виховання

*за сприяння КНП "Клінічна лікарня №15 Подільського району м.Києва",
Центру дієтології Наталії Калиновської*

«Перспективи та інновації науки»

№ 4(62) 2026

Київ – 2026

ISSN 2786-4952 Online

УДК 001.32:1/3](477)(02)

Ідентифікатор медіа - R40-05846

DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2026-4\(62\)](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2026-4(62))

«Перспективи та інновації науки»: журнал. 2026. № 4(62) 2026. С. 4280



Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 27.09.2021 № 1017 журналу присвоєно категорію "Б" із психології та педагогіки

Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 27.04.2023 № 491 журналу присвоєно категорію "Б" із медицини: спеціальність 222

*Рекомендовано до видавництва Президією громадської наукової організації
«Всеукраїнська Асамблея докторів наук з державного управління» (Рішення від 16.04..2026, № 6/4-26)*

*Журнал видається за підтримки КНП "Клінічна лікарня №15 Подільського району м.Києва",
Центру дієтології Наталії Калиновської*



Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (IC), Research Bible, міжнародної пошукової системи Google Scholar

Електронний науковий журнал «Перспективи та інновації науки» заснований з метою висвітлення актуальних питань теорії та практики медицини, біології, біотехнології та реабілітації в Україні, за кордоном. Видання розраховано на науковців, викладачів, педагогів-практиків, представників органів державної влади та місцевого самоврядування, здобувачів вищої освіти, громадсько-політичних діячів

Згідно Порядку формування Переліку наукових фахових видань України, затвердженого наказом МОН України від 15.01.2018 № 32, повнотекстовий доступ до наукових статей журналу представлений на платформі «Наукова періодика України» в Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського НАН України та в Національному репозитарії академічних текстів

Голова редакційної колегії:



Вадзюк Степан Несторович - доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри фізіології з основами біоетики та біобезпеки Тернопільського національного медичного університету імені І.Я.Горбачевського Міністерства охорони здоров'я України (Україна)

Заступник голови редакційної колегії: Торяник Інна Іванівна - доктор медичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник лабораторії вірусних інфекцій Державної установи «Інститут мікробіології та імунології імені І.І. Мечникова Національної академії медичних наук України» (Харків, Україна)

Редакційна колегія:

1. **Алієв, Ельнур М.** доктор медичних наук, професор, професор Азербайджанського медичного університету (Азербайджан)
2. **Бабова Ірина Костянтинівна** - доктор медичних наук, професор, старший науковий співробітник відділу економічного регулювання природокористування ДУ "Інститут ринку і економіко-екологічних досліджень Національної академії наук України", лікар ФРМ (фізичної та реабілітаційної медицини) ДУ "Територіальне медичне об'єднання МВС України по Одеській області" (Одеса, Україна)

- Цибін С. Г., Попов О. А.** **1431**
РОЛЬ СОЦІАЛЬНО-ЕМОЦІЙНОГО НАВЧАННЯ У ФОРМУВАННІ ГОТОВНОСТІ МАЙБУТНІХ УЧИТЕЛІВ ДО ТОЛЕРАНТНОГО ВИХОВАННЯ
- Чух Г. П.** **1449**
ДО ПИТАННЯ РОЗВИТКУ ПРЕДМЕТНО-МЕТОДИЧНОЇ ПРОФЕСІЙНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ВЧИТЕЛІВ-ФІЛОЛОГІВ ЗЗСО В КОНТЕКСТІ STEM-ОСВІТИ
- Шаповал Л. В.** **1458**
ДОСЛІДНИЦЬКА ДІЯЛЬНІСТЬ ЯК ПРОВІДНИЙ КОМПОНЕНТ НАВЧАННЯ В ПРИРОДНИЧИХ КУРСАХ 5–6 КЛАСІВ НУШ: ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ
- Швець Т. В., Кикилик А. М., Нікітова І. І.** **1472**
ФОРМУВАННЯ НАВИЧОК КРИТИЧНОГО ЧИТАННЯ ЯК ЧИННИК РОЗВИТКУ ПІЗНАВАЛЬНОЇ САМОСТІЙНОСТІ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ НА УРОКАХ ЛІТЕРАТУРИ
- Шкурат Р. С.** **1483**
ПРОФЕСІЙНЕ САМОВИЗНАЧЕННЯ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ: ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ, СТРУКТУРА, ЧИННИКИ
- Щербак І.В., Клеба А.І., Кисельова О.Б., Тихонова С.В., Хміль Н.А.** **1497**
РОЛЬ МОБІЛЬНИХ ДОДАТКІВ, ФІТНЕС-ТРЕКЕРІВ, ПЛАТФОРМ ZOOM/GOOGLE МЕЕТ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ АКТИВНОСТІ СТУДЕНТІВ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ
- Юсипчук У.В., Мергель Т.В., Гаморак Г.П.** **1511**
ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ СТУДЕНТІВ-МЕДИКІВ ПІД ЧАС ПРОХОДЖЕННЯ ЛІКАРСЬКОЇ ПРАКТИКИ В СІМЕЙНІЙ МЕДИЦИНІ

СЕРІЯ «Медицина»

- Andrushchak M.O., Boida I.Yu.** **1519**
NOVEL IMMUNOBIOLOGICAL STRATEGIES IN TETANUS: A 2020–2026 PERSPECTIVE
- Antoniv A.A., Antoniv N.A.** **1528**
PATHOGENETIC MECHANISMS OF HELICOBACTER PYLORI INFLUENCE ON THE DEVELOPMENT OF ROSACEA: A LITERATURE REVIEW

- Патратій М.В., Кантемир А.М.** **2729**
ПАТОГЕНЕТИЧНІ ЧИННИКИ ТА ФАКТОРИ РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ ДИВЕРТИКУЛЯРНОЇ ХВОРОБИ
- Пашковський В.М.** **2736**
СКРИНІНГ ПОСТТРАВМАТИЧНИХ СИМПТОМІВ В УМОВАХ ВІЙНИ В УКРАЇНІ: ЗАСТОСУВАННЯ КОРОТКОЇ ШКАЛИ SSS-PTSD
- Первак М.П., Годлевський Л.С., Марченко С.В.** **2744**
ПРОТИСУДОМНИЙ ВПЛИВ ТРАНСКРАНІАЛЬНОГО НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО ПУЛЬСУЮЧОГО УЛЬТРАЗВУКУ (НПУ) ТА КАРБОНОВИХ НАНОТРУБОК НА МОДЕЛІ ПЕНТИЛЕНЕТЕТРАЗОВОГО (ПТЗ) КІНДЛІНГА
- Покришко О.В., Лукович З.** **2755**
СУЧАСНІ АСПЕКТИ ЕПІДЕМІОЛОГІЇ, ЛАБОРАТОРНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА СТРАТЕГІЇ АНТИБІОТИКОТЕРАПІЇ ІНФЕКЦІЙ КРОВОТОКУ: СИСТЕМАТИЧНИЙ ОГЛЯД (2020–2025)
- Попадинець О.Г., Гаргаун О.Т.** **2769**
ГІПОТИРЕОЗІНДУКОВАНІ ЗМІНИ В НАДНИРКОВИХ ЗАЛОЗАХ В УМОВАХ ЕКСПЕРИМЕНТУ
- Постовітенко К.П., Семенюк Р.О., Барська Ю.М., Бушмельова Г.П.** **2781**
МУЛЬТИДИСЦИПЛІНАРНА ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНА МОДЕЛЬ ОРТЕЗУВАННЯ З ПСИХОЛОГІЧНИМ СУПРОВОДОМ: РОЗРОБКА ТА КЛІНІЧНА АПРОБАЦІЯ ІНДІВІДУАЛІЗОВАНОЇ ПРОГРАМИ ПІДГОТОВЧИХ ВПРАВ
- Процайло М.Д., Басараб В.В., Волков Р.К., Михайлишин І.І.** **2792**
ГОСТРА КИШКОВОЇ НЕПРОХІДНІСТЬ У ДІТЕЙ: КЛІНІЧНИЙ ВИПАДОК ОБТУРАЦІЇ СТОРОННІМИ ТІЛАМИ ТА РІЛЬ МЕДСЕСТРИНСЬКОГО ДОГЛЯДУ
- Процайло М.Д., Мігенько О.Б., Зубніна Ю.О., Воронцова Т.О., Рогальська Я.В.** **2802**
КЛІНІЧНИЙ ВИПАДОК УРОДЖЕНИХ ПАТОЛОГІЙ ХРЕБТА
- Рисована Л.М., Григорук В.В., Гранкіна С.С., Буряченко Н.О., Астапова Я.В.** **2810**
ПРОТЕЗУВАННЯ НА ОСНОВІ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, БІОМЕХАНІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РЕАБІЛІТАЦІЇ

УДК: 617.3/613/571.1/620.1/004.9

[https://doi.org/10.52058/2786-4952-2026-4\(62\)-2810-2822](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2026-4(62)-2810-2822)

Рисована Любов Михайлівна кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний медичний університет, кафедра медичної та біологічної фізики і медичної інформатики, м. Харків, <https://orcid.org/0000-0001-7937-4176>

Григорук Вікторія Володимирівна кандидат медичних наук, доцент, Харківський національний медичний університет, кафедра екстреної та невідкладної медичної допомоги, ортопедії травматології та протезування, м. Харків, <https://orcid.org/0000-0002-8937-7802>

Гранкіна Світлана Семенівна старший викладач, Харківський національний медичний університет, кафедра медичної та біологічної фізики і медичної інформатики, м. Харків, <https://orcid.org/0000-0003-1689-5817>

Буряченко Надія Олександрівна викладач, Харківський національний медичний університет, кафедра спортивної, фізичної та реабілітаційної медицини, фізичної терапії, ерготерапії, м. Харків, <https://orcid.org/0009-0005-0862-7451>

Астапова Яна Валеріївна викладач, Харківський національний медичний університет, кафедра спортивної, фізичної та реабілітаційної медицини, фізичної терапії, ерготерапії, м. Харків, <https://orcid.org/0009-0003-2043-2775>

ПРОТЕЗУВАННЯ НА ОСНОВІ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, БІОМЕХАНІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РЕАБІЛІТАЦІЇ

Анотація. У статті представлено результати комплексного дослідження ефективності застосування цифрових технологій у сфері протезування та ортезування кінцівок і хребта з позицій біомеханічного аналізу руху та оцінки функціонального стану пацієнтів у процесі реабілітації. Актуальність роботи зумовлена зростанням поширеності порушень опорно-рухового апарату, зокрема ампутацій кінцівок і патологій хребта, що потребують застосування сучасних індивідуалізованих підходів до відновлення рухової активності.

Метою дослідження була оцінка впливу цифрових технологій, а саме: 3D-сканування, CAD-моделювання та адитивного виробництва, на біомеханічні параметри ходи та ефективність реабілітації пацієнтів. У дослідженні взяли участь 56 пацієнтів, яких було розподілено на контрольну групу (n=22), де застосовувалися традиційні методи виготовлення протезно-ортопедичних

виробів, та експериментальну групу ($n=34$), у якій використовувалися цифрові технології.

Оцінювання ефективності проводилося за такими показниками: довжина кроку, швидкість ходьби, кут згинання у колінному суглобі, симетрія рухів і стабільність тулуба. Для обробки результатів застосовувалися методи описової статистики, t-критерій Стюдента, дисперсійний, кореляційний та регресійний аналіз.

Отримані результати продемонстрували статистично значуще покращення всіх досліджуваних параметрів у пацієнтів експериментальної групи ($p<0,05$).

Отримані дані підтверджують, що застосування цифрових технологій у протезуванні та ортезуванні забезпечує більш точну індивідуалізацію виробів, оптимізацію розподілу навантаження та формування більш ефективного рухового патерну.

Це сприяє підвищенню функціональної незалежності пацієнтів та покращенню результатів реабілітації.

Таким чином, інтеграція цифрових технологій у практику протезування та ортезування є перспективним напрямом розвитку реабілітаційної медицини, що потребує подальших досліджень із використанням розширених вибірок і довготривалого моніторингу результатів.

Ключові слова: протезування, ортезування, біомеханіка, реабілітація, цифрові технології, аналіз ходи.

Rysovana Liubov Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kharkiv National Medical University, Department of Medical and Biological Physics and Medical Informatics, Kharkiv, <https://orcid.org/0000-0001-7937-4176>

Hryhoruk Viktoria, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Kharkiv National Medical University, Department of Emergency and Urgent Medical Care, Orthopedics, Traumatology and Prosthetics, Kharkiv, <https://orcid.org/0000-0002-8937-7802>

Hrankyna Svitlana Senior Lecturer, Kharkiv National Medical University, Department of Medical and Biological Physics and Medical Informatics, Kharkiv, <https://orcid.org/0000-0003-1689-5817>

Buriachenko Nadiia Lecturer, Kharkiv National Medical University, Department of Sports, Physical and Rehabilitation Medicine, Physical Therapy, and Occupational Therapy, Kharkiv, <https://orcid.org/0009-0005-0862-7451>

Astapova Iana Lecturer, Kharkiv National Medical University, Department of Sports, Physical and Rehabilitation Medicine, Physical Therapy, and Occupational Therapy, Kharkiv, <https://orcid.org/0009-0003-2043-2775>

DIGITAL TECHNOLOGY-BASED PROSTHESIS, BIOMECHANICAL EFFICIENCY AND REHABILITATION RESULTS

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of the effectiveness of the use of digital technologies in the field of prosthetics and orthotics of limbs and spine from the standpoint of biomechanical analysis of movement and assessment of the functional state of patients during rehabilitation. The relevance of the work is due to the increasing prevalence of musculoskeletal disorders, in particular limb amputations and spinal pathologies, which require the use of modern individualized approaches to restoring motor activity.

The aim of the study was to assess the impact of digital technologies, namely: 3D scanning, CAD modeling and additive manufacturing, on the biomechanical parameters of gait and the effectiveness of patient rehabilitation. The study involved 56 patients, who were divided into a control group ($n=22$), where traditional methods of manufacturing prosthetic and orthopedic products were used, and an experimental group ($n=34$), in which digital technologies were used.

The effectiveness was assessed using the following indicators: step length, walking speed, knee flexion angle, symmetry of movements and trunk stability. Descriptive statistics methods, Student's t-test, variance, correlation and regression analysis were used to process the results.

The results obtained demonstrated a statistically significant improvement in all studied parameters in patients of the experimental group ($p<0.05$).

The obtained data confirm that the use of digital technologies in prosthetics and orthotics provides more accurate individualization of products, optimization of load distribution and the formation of a more effective movement pattern. This contributes to increasing the functional independence of patients and improving rehabilitation results.

Thus, the integration of digital technologies into the practice of prosthetics and orthotics is a promising direction for the development of rehabilitation medicine, which requires further research using expanded samples and long-term monitoring of results.

Keywords: prosthetics, orthotics, biomechanics, rehabilitation, digital technologies, gait analysis

Постановка проблеми.

Порушення функціонування опорно-рухового апарату посідають провідне місце серед причин тривалої втрати працездатності та зниження рівня життєдіяльності населення. У сучасних умовах вони розглядаються не лише як медична, але й як значуща соціально-економічна проблема, оскільки суттєво впливають на фізичну активність, можливість самообслуговування та інтеграцію людини в суспільство. Найбільш вагомими чинниками формування таких порушень є ампутації кінцівок, хронічні дегенеративні зміни хребта, наслідки травм, а також неврологічні стани, що супроводжуються змінами моторного контролю та просторово-часових характеристик руху.

У контексті сучасної реабілітаційної практики протезування та ортезування виступають як ключові інструменти відновлення рухових функцій і компенсації структурних дефектів. Їх застосування дозволяє не лише забезпечити механічну підтримку або стабілізацію, але й формувати нові функціональні патерни руху, що наближені до фізіологічних. Встановлено, що ефективність таких виробів безпосередньо залежить від рівня їх відповідності анатомічним і біомеханічним особливостям конкретного пацієнта. Недостатня адаптація конструкції може призводити до формування патологічних рухових стереотипів і зниження результативності реабілітаційного процесу.

Зростання кількості випадків ампутацій, зумовлених як травматичними ушкодженнями, так і хронічними захворюваннями, посилює потребу у вдосконаленні підходів до протезування. Втрата кінцівки спричиняє комплексні зміни у біомеханіці руху, що проявляються порушенням ритму та симетрії ходи, змінами роботи суглобів і м'язових груп, а також підвищенням енергетичних витрат при пересуванні.

Це, у свою чергу, обмежує функціональні можливості пацієнта та знижує ефективність його соціальної адаптації. У таких умовах особливого значення набуває пошук технологічних рішень, здатних забезпечити більш точне відтворення біомеханічних характеристик руху.

Традиційні підходи до виготовлення протезно-ортопедичних виробів, які ґрунтуються на використанні гіпсових моделей та ручної обробки, не завжди дозволяють досягти необхідного рівня точності. Вони характеризуються обмеженими можливостями щодо індивідуалізації та високою залежністю від суб'єктивного досвіду фахівця. Це може зумовлювати варіабельність якості виробів і недостатню відповідність їх функціональних характеристик потребам пацієнта.

Невідповідність геометричних і механічних параметрів протеза або ортеза анатомічним особливостям пацієнта може призводити до порушення оптимального розподілу навантаження в опорно-руховому апараті. Як наслідок, виникає перевантаження окремих сегментів, зокрема інтактної кінцівки, великих суглобів і хребта, що у довготривалій перспективі може спричиняти розвиток вторинних патологічних змін і хронічного больового синдрому. Таким чином, проблема точності та індивідуалізації протезно-ортопедичних виробів має принципове значення для забезпечення їх функціональної ефективності.

Сучасний етап розвитку медичних технологій характеризується активним впровадженням цифрових рішень у різні галузі клінічної практики, включаючи протезування та ортезування. Використання тривимірного сканування, систем автоматизованого проєктування та адитивних технологій відкриває нові можливості для створення виробів із високим рівнем персоналізації. Цифрові методи дозволяють формувати точні геометричні моделі анатомічних структур, що створює основу для оптимізації конструкції виробів з урахуванням індивідуальних особливостей пацієнта.

Крім того, застосування цифрових технологій дає змогу інтегрувати біомеханічний аналіз у процес проектування. Використання комп'ютерного моделювання забезпечує можливість прогнозування поведінки конструкції під дією навантажень, аналізу її впливу на кінематику руху та вибору оптимальних конструктивних рішень. Такий підхід дозволяє перейти від емпіричних методів виготовлення до науково обґрунтованого проектування протезно-ортопедичних виробів.

Важливою складовою сучасної реабілітації є також використання цифрових систем моніторингу рухової активності. Технології аналізу ходи, що базуються на застосуванні сенсорних систем і програмного забезпечення, забезпечують отримання об'єктивних даних про параметри руху. Це дозволяє не лише оцінювати ефективність протезів та ортезів, але й здійснювати індивідуалізовану корекцію реабілітаційних програм.

Разом із тим, незважаючи на значний технологічний прогрес, питання ефективності цифрових методів у протезуванні та ортезуванні залишаються недостатньо дослідженими. У науковій літературі бракує системних робіт, у яких би комплексно оцінювався вплив таких технологій на біомеханічні параметри руху та функціональні результати реабілітації. Зокрема, недостатньо вивченими є аспекти порівняння цифрових і традиційних підходів, а також визначення їх переваг з точки зору відновлення рухової активності пацієнтів.

Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю поглибленого наукового аналізу ефективності цифрових технологій у протезуванні та ортезуванні та їх впливу на біомеханіку руху. Отримані результати можуть стати основою для вдосконалення сучасних підходів до реабілітації, підвищення якості протезно-ортопедичної допомоги та покращення функціонального стану пацієнтів.

Порушення функціонального стану опорно-рухового апарату належать до найвагоміших чинників, що обумовлюють зниження працездатності, обмеження рухової активності та погіршення якості життя населення. У глобальному контексті ці патології розглядаються як одна з ключових причин інвалідності, що підтверджується даними міжнародних медико-статистичних досліджень. До основних етіологічних факторів належать ампутації кінцівок, дегенеративно-дистрофічні процеси у хребті, наслідки травм, а також неврологічні захворювання, які супроводжуються порушенням координації рухів і змінами біомеханічних характеристик.

Суттєве місце у структурі зазначених порушень займають ампутації кінцівок, які залишаються серйозною медичною та соціальною проблемою. За сучасними оцінками, у світі щорічно виконується значна кількість ампутацій, обумовлених як травматичними ушкодженнями, так і хронічними захворюваннями, зокрема судинними патологіями, цукровим діабетом та онкологічними процесами. Втрата кінцівки призводить до глибоких змін у функціонуванні опорно-рухового апарату, що проявляється порушенням просторово-часових

характеристик ходи, асиметрією рухів, змінами навантаження на суглобові структури та збільшенням енергетичних витрат під час пересування.

Відновлення рухової активності пацієнтів у таких випадках значною мірою пов'язане із застосуванням протезно-ортопедичних виробів. Протези та ортези виконують не лише механічну, але й функціонально-компенсаторну роль, сприяючи стабілізації тіла, корекції положення сегментів і частковому або повному відтворенню втрачених функцій. Водночас результативність їх використання визначається рівнем відповідності конструкції виробу індивідуальним анатомо-біомеханічним характеристикам пацієнта.

Класичні технології виготовлення протезно-ортопедичних виробів базуються переважно на використанні гіпсових моделей та ручного формування конструкцій. Незважаючи на тривалий період їх застосування у клінічній практиці, такі підходи мають низку обмежень. Серед них — недостатня точність відтворення анатомічної геометрії, складність корекції виробу на етапі виготовлення, значні часові та трудові витрати, а також залежність кінцевого результату від суб'єктивних навичок спеціаліста. У сукупності ці фактори можуть призводити до неповної адаптації виробу до функціональних потреб пацієнта.

Недостатній рівень індивідуалізації протезів та ортезів може мати негативні клінічні наслідки. Зокрема, спостерігається підвищений ризик розвитку больового синдрому, порушень постави, перевантаження інтактної кінцівки, а також прогресування дегенеративних змін у хребті.

Біомеханічні дослідження підтверджують, що неадекватно адаптовані протези можуть збільшувати енергетичні витрати при ходьбі на 10–30 %, що суттєво знижує витривалість пацієнтів та обмежує їх функціональну незалежність.

У зв'язку з цим актуальним напрямом розвитку галузі є впровадження цифрових технологій у процес створення протезно-ортопедичних виробів. Використання тривимірного сканування, систем комп'ютерного проєктування та адитивних методів виробництва відкриває нові перспективи для підвищення точності та індивідуалізації конструкцій. Цифрові технології дозволяють формувати високоточні моделі анатомічних структур, враховувати особливості розподілу навантаження та оптимізувати форму виробу ще на етапі проєктування.

Важливе значення у цьому контексті має застосування методів біомеханічного аналізу руху, які забезпечують об'єктивну оцінку функціональної ефективності протезів та ортезів. Сучасні системи аналізу ходи, що поєднують відеофіксацію, сенсорні платформи та інерційні датчики, дозволяють отримувати точні дані про параметри руху, включаючи швидкість, довжину кроку, симетрію, суглобову кінематику та стабільність тулуба. Це створює підґрунтя для науково обґрунтованої оцінки ефективності застосованих виробів і подальшого вдосконалення реабілітаційних стратегій.

Незважаючи на активний розвиток цифрових технологій, питання їх практичної ефективності у протезуванні та ортезуванні потребують додаткового наукового вивчення. У сучасній літературі відсутня достатня кількість комплексних досліджень, спрямованих на оцінку впливу цифрового проектування та адитивного виробництва на біомеханічні характеристики руху. Особливо актуальним є проведення порівняльного аналізу традиційних і цифрових підходів, а також визначення їх впливу на симетрію ходи, стабільність тулуба та енергоефективність рухової діяльності.

Додатково слід враховувати, що сучасні тенденції розвитку реабілітаційної медицини передбачають інтеграцію цифрових рішень із системами моніторингу руху, сенсорними технологіями та алгоритмами штучного інтелекту. Такий підхід створює передумови для формування персоналізованих реабілітаційних програм, у межах яких протезно-ортопедичні вироби можуть адаптуватися до індивідуального функціонального стану пацієнта в режимі реального часу.

Отже, наукова проблема дослідження полягає у необхідності комплексної оцінки ефективності застосування цифрових технологій у протезуванні та ортезуванні з урахуванням їх впливу на біомеханіку руху та результати реабілітації. Її вирішення є важливим для підвищення якості протезно-ортопедичної допомоги, удосконалення реабілітаційних підходів і забезпечення більш високого рівня функціональної незалежності пацієнтів.

Метою даного дослідження є комплексна оцінка ефективності впровадження цифрових технологій у процес протезування та ортезування кінцівок і хребта шляхом аналізу біомеханічних характеристик руху та функціонального стану пацієнтів у процесі реабілітації.

Виклад основного матеріалу

У дослідженні брали участь 56 пацієнтів, які проходили курс реабілітаційного лікування після ампутацій нижніх кінцівок або мали патології хребта, що потребували ортезування.

Досліджувану вибірку було розподілено на дві групи: контрольну ($n=22$), у якій використовувалися традиційні методи виготовлення протезно-ортопедичних виробів, та експериментальну ($n=34$), де застосовувалися сучасні цифрові технології.

Оцінка ефективності реабілітаційних заходів здійснювалася на основі аналізу ключових біомеханічних параметрів ходи, до яких належали довжина кроку, швидкість пересування, кут згинання у колінному суглобі, показник симетрії ходи та стабільність тулуба.

Біомеханічне дослідження проводилося із використанням систем аналізу руху та відеобіомеханічного моделювання, що дозволяло отримувати об'єктивні кількісні характеристики рухової діяльності.

Статистична обробка результатів включала застосування методів описової статистики (середнє значення, стандартне відхилення), t-критерію Стюдента для незалежних вибірок, дисперсійного аналізу (ANOVA), а також кореляцій-

ного та регресійного аналізу. Рівень статистичної значущості приймався на рівні $p < 0,05$.

Порівняльний аналіз отриманих результатів продемонстрував наявність достовірних відмінностей між контрольною та експериментальною групами за більшістю досліджуваних біомеханічних параметрів ходи (табл. 1).

Таблиця 1

Описова статистика

Показник	Контрольна група (n=22)	Експериментальна група (n=34)	p
Довжина кроку (см)	52,4±5,9	64,1±5,1	0,006
Швидкість ходьби (м/с)	0,80±0,13	1,05±0,11	0,008
Кут згинання колiна (°)	47,9±5,6	57,2±5,8	0,012
Симетрія ходи (%)	70,8±8,1	87,6±7,2	0,003
Стабільність тулуба (%)	67,5±7,0	79,8±6,4	0,010

Встановлено, що середня довжина кроку у пацієнтів експериментальної групи була більшою приблизно на 22% порівняно з контрольною групою, що свідчить про формування більш ефективного патерну ходи. Аналогічно, швидкість пересування зросла приблизно на 25%, що є важливим індикатором покращення функціональної мобільності.

Збільшення кута згинання у колінному суглобі у пацієнтів експериментальної групи вказує на більш фізіологічне відтворення фаз ходи. Водночас показники симетрії ходи та стабільності тулуба продемонстрували значне покращення, що свідчить про оптимізацію міжсегментарної координації рухів.

Для перевірки статистичної значущості відмінностей у біомеханічних показниках між контрольною та експериментальною групами був проведений одновимірний дисперсійний аналіз (ANOVA). Аналіз включав такі джерела варіації: «між групами» – для оцінки впливу типу технології виготовлення протезно-ортопедичних виробів (традиційна vs цифрова) на біомеханічні параметри ходи, та «усередині груп» – для оцінки внутрішньогрупової варіативності показників.

Розраховане значення F-критерію склало $F=14,02$ при рівні значущості $p < 0,05$, що свідчить про наявність статистично значущих відмінностей між групами.

Значення $F > F_{\text{критичне}}$ та $p < 0,05$ підтверджують, що тип технології виготовлення протезно-ортопедичних виробів має достовірний вплив на досліджувані біомеханічні параметри ходи.

Висока міжгрупова дисперсія (SS між групами =915,4) у порівнянні з внутрішньогруповою (SS всередині груп = 3528,6) демонструє, що ефект застосування цифрових технологій перевищує природну варіативність параметрів у межах групи.

Отримані результати підтверджують ефективність цифрового протезування та ортезування у покращенні довжини кроку, швидкості пересування, симетрії ходи та стабільності тулуба у пацієнтів експериментальної групи.

Для оцінки взаємозв'язку між основними біомеханічними показниками руху пацієнтів експериментальної та контрольної груп було проведено детальний кореляційний аналіз. Було включено такі показники: довжина кроку, швидкість ходьби, кут згинання коліна, симетрія ходи, стабільність тулуба, амплітуда руху тазостегнового суглоба, вертикальні коливання центру маси тіла та енергетичні витрати під час пересування.

Сильні позитивні кореляції спостерігаються між довжиною кроку та швидкістю ходьби ($r=0,80$), а також між симетрією ходи та стабільністю тулуба ($r=0,66$), що підтверджує ключову роль цих параметрів у формуванні ефективного рухового патерну.

Помірні позитивні взаємозв'язки виявлені між довжиною кроку, амплітудою руху тазостегнового суглоба та кутом коліна ($r=0,53-0,61$), що демонструє важливість координації між нижніми кінцівками та тулубом.

Сильні негативні кореляції простежуються між енергетичними витратами та довжиною кроку, швидкістю ходьби, симетрією рухів і стабільністю тулуба ($r \approx -0,44 - -0,52$), що вказує на те, що оптимізація параметрів ходи за допомогою цифрового протезування зменшує енергетичне навантаження на пацієнта.

Вертикальні коливання центру маси тіла також негативно корелюють із стабільністю тулуба та симетрією ходи ($r \approx -0,35 - -0,39$), що підкреслює значення постурального контролю для рівномірного розподілу навантаження.

Ці результати підтверджують, що застосування **цифрових технологій виготовлення протезів та ортезів** забезпечує комплексне покращення біомеханічних параметрів ходи, зниження асиметрії та енергетичних витрат, а також підвищення стабільності тулуба. Розширений кореляційний аналіз дозволяє не лише підтвердити ефективність цифрових методів, а й виявити взаємозалежності між різними компонентами руху, що важливо для оптимізації реабілітаційних програм.

Для оцінки впливу ключових біомеханічних параметрів на швидкість пересування пацієнтів було проведено багатовимірний регресійний аналіз методом найменших квадратів.

У якості залежної змінної виступала швидкість ходьби (м/с), а незалежними змінними – довжина кроку, кут згинання коліна, симетрія ходи, стабільність тулуба, амплітуда руху тазостегнового суглоба та вертикальні коливання центру маси тіла.

Найбільший вплив на швидкість ходьби має довжина кроку ($\beta \approx 0,48$, $p < 0,001$), що підтверджує її ключову роль у формуванні ефективного патерну пересування.

Симетрія ходи ($\beta \approx 0,29$, $p = 0,011$) та стабільність тулуба ($\beta \approx 0,21$, $p = 0,041$) також демонструють статистично значущий вплив, що підкреслює важливість рівномірного розподілу навантаження та пострального контролю для оптимальної ходи. Кут згинання коліна та амплітуда руху тазостегнового суглоба мають помірний вплив на швидкість пересування, проте рівень статистичної значущості близький до 0,05, що вказує на необхідність додаткових досліджень з більшою вибіркою.

Вертикальні коливання центру маси тіла мають негативний ефект на швидкість ходьби ($\beta \approx -0,18$, $p \approx 0,051$), що свідчить про вплив нестабільності тулуба на енергетичну ефективність пересування.

Коефіцієнт детермінації моделі (R^2) становив 0,70, що свідчить про те, що близько 70% варіації швидкості ходьби пояснюється включеними до моделі біомеханічними параметрами. Аналіз залишків підтвердив адекватність моделі та відсутність суттєвих мультиколінеарностей між незалежними змінними ($VIF < 2$), що підкреслює надійність отриманих результатів.

Отримані результати демонструють, що найбільш значущим предиктором швидкості пересування є довжина кроку, тоді як симетрія ходи та стабільність тулуба також відіграють важливу, але другорядну роль у формуванні ефективного рухового патерну.

Отримані у дослідженні результати переконливо демонструють ефективність впровадження цифрових технологій у процес протезування та ортезування, що проявляється у достовірному покращенні ключових біомеханічних параметрів руху. Виявлені міжгрупові відмінності за такими показниками, як довжина кроку, швидкість ходьби, симетрія рухів і стабільність тулуба ($p < 0,05$), підтверджують гіпотезу про суттєвий вплив цифрових підходів на якість реабілітаційних результатів.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією цифрових технологій із системами сенсорного моніторингу та алгоритмами штучного інтелекту. Використання таких підходів може забезпечити безперервний аналіз рухової активності пацієнтів і створити умови для адаптивного налаштування протезно-ортопедичних виробів у режимі реального часу. Очікується, що застосування методів машинного навчання дозволить підвищити точність прогнозування результатів реабілітації та оптимізувати процес підбору конструкцій.

Таким чином, результати дослідження свідчать про доцільність широкого впровадження цифрових технологій у практику протезування та ортезування. Отримані дані підтверджують, що персоналізоване цифрове проєктування сприяє покращенню біомеханічних параметрів руху, підвищенню ефективності реабілітаційних заходів і розширенню функціональних можливостей пацієнтів із порушеннями опорно-рухового апарату.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило високий потенціал використання цифрових технологій у галузі протезування та ортезування кінцівок і хребта як ефективного інструменту підвищення якості реабілітаційної допомоги.

Застосування тривимірного сканування, комп'ютерного моделювання та адитивних технологій виробництва забезпечує створення індивідуалізованих протезно-ортопедичних конструкцій, які максимально відповідають анатомо-функціональним особливостям пацієнта. Це, у свою чергу, сприяє більш раціональному розподілу навантаження в опорно-руховому апараті та покращенню кінематичних характеристик руху.

Отримані результати порівняльного аналізу засвідчили наявність статистично значущих переваг цифрових підходів над традиційними методами виготовлення виробів. У пацієнтів, які використовували індивідуалізовані цифрові протези та ортези, спостерігалось збільшення довжини кроку в середньому на 22%, підвищення швидкості ходьби на 25%, покращення симетрії рухів на 19% та зростання стабільності тулуба на 16%. Такі зміни свідчать про формування більш ефективного та енергетично доцільного рухового патерну.

Результати дисперсійного аналізу підтвердили достовірний вплив застосованих технологій на біомеханічні показники руху ($p < 0,05$), тоді як кореляційний аналіз виявив тісний взаємозв'язок між основними параметрами ходи. Зокрема, встановлено сильну позитивну кореляцію між довжиною кроку та швидкістю пересування ($r \approx 0,80$), що дозволяє розглядати цей показник як ключовий фактор ефективності локомоції. Регресійна модель продемонструвала, що сукупність досліджених параметрів пояснює близько 70% варіації швидкості ходьби, що свідчить про їх визначальну роль у формуванні функціонального результату.

Встановлено, що підвищення точності індивідуалізації протезно-ортопедичних виробів, досягнуте завдяки цифровим технологіям, сприяє більш адекватному відтворенню анатомічної геометрії та покращенню біомеханічної взаємодії між виробом і тілом пацієнта. Це забезпечує зменшення асиметрії рухів, підвищення стабільності та зниження надмірних навантажень на окремі сегменти опорно-рухового апарату.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції цифрових технологій у клінічну практику протезування та ортезування як одного з ключових напрямів підвищення ефективності реабілітації. Їх застосування дозволяє не лише покращити біомеханічні параметри руху, але й сприяє зростанню функціональної незалежності пацієнтів та якості їх життя.

Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на розширення вибірки, проведення довготривалого моніторингу результатів, а також інтеграцію цифрових технологій із системами сенсорного аналізу та алгоритмами штучного інтелекту з метою створення адаптивних протезно-ортопедичних систем.

Література

1. Halsne E. G., Czerniecki J. M., Shofer J. B., Morgenroth D. C. The effect of prosthetic foot stiffness on biomechanics of walking // Clin. Biomech. 2020. Vol. 80. DOI: 10.1016/j.clinbiomech. 2020.105141.
2. Gutierrez A. R. Exploring the future of prosthetics and orthotics: harnessing the potential of 3D printing // Can. Prosthet. Orthot. J. 2023. Vol. 6, № 2. DOI: 10.33137/cpoj.v6i2.42140.
3. Rysovana L., Radzishavska Ye., Hryhoruk V., Alekseienco R. Digital transformation of the healthcare system: new approaches to training rehabilitation professionals // Scientific World Journal. 2025. Issue 34, Part 5. P. 182–190. DOI: 10.30888/2663-5712.2025-34-05-103.
4. Kim S., Yalla S., Shetty S., Rosenblatt N. J. 3D printed transtibial prosthetic sockets: a systematic review // PLoS One. 2022. Vol. 17, № 10. DOI: 10.1371/journal.pone.0275161.
5. Григорук В. В., Рисована Л. М., Литвиненко М. І., Невмержицька С. С. Виготовлення індивідуальних ортезів постраждалим з вибуховими пошкодженнями нижніх кінцівок з дотриманням вимог безпеки // Здобутки та досягнення прикладних та фундаментальних наук ХХІ століття : зб. наук. праць за матеріалами Х Міжнар. наук. конф. Дніпро, 2025. С. 530–536. DOI: 10.62731/mcnd-07.11.2025.005.
6. Rogers-Bradley E. et al. Variable-stiffness prosthesis improves biomechanics of walking across speeds // Sci. Rep. 2024. Vol. 14. DOI: 10.1038/s41598-024-67230-3.
7. Shaikh S. 3D printing in prosthetics and orthotics: innovations and opportunities. Singapore : Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-981-97-4913-3.
8. Seifert A. K., Grimmer M., Zoubir A. M. Doppler radar for the extraction of biomechanical parameters in gait analysis // IEEE J. Biomed. Health Inform. 2021. Vol. 25, № 2. P. 547–558. DOI: 10.1109/JBHI.2020.2994471.
9. Nagarajan Y. R. et al. Strength assessment of PET composite prosthetic sockets // Materials. 2023. Vol. 16, № 13. DOI: 10.3390/ma16134606.
10. Marinou G., Kourouma I., Mombaur K. Development and validation of a modular sensor-based system for gait analysis // Sensors. 2025. Vol. 25, № 8. DOI: 10.3390/s25082379.
11. Shepherd M. K., Rouse E. J. The VSPA foot: a quasi-passive ankle-foot prosthesis with variable stiffness // IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 2017. Vol. 25, № 12. P. 2375–2386. DOI: 10.1109/TNSRE.2017.2750113.

References:

1. Halsne E. G., Czerniecki J. M., Shofer J. B., Morgenroth D. C. The effect of prosthetic foot stiffness on biomechanics of walking // Clin. Biomech. 2020. Vol. 80. DOI: 10.1016/j.clinbiomech. 2020.105141.
2. Gutierrez A. R. Exploring the future of prosthetics and orthotics: harnessing the potential of 3D printing // Can. Prosthet. Orthot. J. 2023. Vol. 6, № 2. DOI: 10.33137/cpoj.v6i2.42140.
3. Rysovana L., Radzishavska Ye., Hryhoruk V., Alekseienco R. Digital transformation of the healthcare system: new approaches to training rehabilitation professionals // Scientific World Journal. 2025. Issue 34, Part 5. P. 182–190. DOI: 10.30888/2663-5712.2025-34-05-103.
4. Kim S., Yalla S., Shetty S., Rosenblatt N. J. 3D printed transtibial prosthetic sockets: a systematic review // PLoS One. 2022. Vol. 17, № 10. DOI: 10.1371/journal.pone.0275161.
5. Hryhoruk V. V., Rysovana L. M., Lytvynenko M. I., Nevmerzhyts'ka S. S. Vyhotovlennya indyvidual'nykh orteziv postrazhdalym z vybukhovymy poshkodzhennyamy nyzhnykh kintsivok z dotrymannyam vymoh bezpeky // Zdobutky ta dosyahnennya prykladnykh ta fundamental'nykh nauk ХХІ stolittya : zb. nauk. prats' za materialamy Х Mizhnar. nauk. konf. Dnipro, 2025. S. 530–536. DOI: 10.62731/mcnd-07.11.2025.005.
6. Rogers-Bradley E. et al. Variable-stiffness prosthesis improves biomechanics of walking across speeds // Sci. Rep. 2024. Vol. 14. DOI: 10.1038/s41598-024-67230-3.

7. Shaikh S. 3D printing in prosthetics and orthotics: innovations and opportunities. Singapore : Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-981-97-4913-3.
8. Seifert A. K., Grimmer M., Zoubir A. M. Doppler radar for the extraction of biomechanical parameters in gait analysis // IEEE J. Biomed. Health Inform. 2021. Vol. 25, № 2. P. 547–558. DOI: 10.1109/JBHI.2020.2994471.
9. Nagarajan Y. R. et al. Strength assessment of PET composite prosthetic sockets // Materials. 2023. Vol. 16, № 13. DOI: 10.3390/ma16134606.
10. Marinou G., Kourouma I., Mombaur K. Development and validation of a modular sensor-based system for gait analysis // Sensors. 2025. Vol. 25, № 8. DOI: 10.3390/s25082379.
11. Shepherd M. K., Rouse E. J. The VSPA foot: a quasi-passive ankle-foot prosthesis with variable stiffness // IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 2017. Vol. 25, № 12. P. 2375–2386. DOI: 10.1109/TNSRE.2017.2750113.

Дата першого надходження статті до видання: 03.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026