

СТАТОДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ ТІЛА ТА ПАТЕРН ХОДИ ВЕТЕРАНІВ ВІЙНИ З ПРОТЕЗОВАНИМИ НИЖНІМИ КІНЦІВКАМИ: АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТА СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

Литвиненко Юрій^{1(ABCDEF)}, Пітенко Сергій^{2(ABEF)}, Кепський Максим^{3(CEF)}

¹ Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна

² Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, м. Київ, Україна

³ Національний тренувальний центр «Quatichan» (Rowing Canada Aviron), м. Ванкувер, Канада

Внесок автора:

A — концепція та дизайн дослідження; B — збір даних;
C — аналіз та інтерпретація даних; D — написання статті;
E — редагування статті; F — остаточне затвердження статті

Анотація

Актуальність. Зростання кількості ветеранів війни з ампутаціями та специфіка бойової травми вимагають перегляду стандартних реабілітаційних моделей. Нераціональні рухові стратегії спричиняють вторинні ускладнення, знижують якість їх життя. Накопичений науковий потенціал потребує узагальнення для розробки програм відновлення стійкості тіла та ходи ветеранів війни.

Мета дослідження — проаналізувати та узагальнити сучасні науково-практичні підходи та проблеми, що впливають на формування механізмів статодинамічної стійкості тіла та патерну ходи ветеранів війни з протезованими нижніми кінцівками, визначити пріоритетні напрями для розробки персоналізованих реабілітаційних протоколів в умовах сучасної системи охорони здоров'я України.

Матеріал і методи: аналіз джерел у базах PubMed, Google Scholar, Web of Science, Research Gate. Критерії включення: праці, переважно за останні 10–15 років, що фокусуються на біомеханіці ходи та рівновазі осіб з протезованими нижніми кінцівками та розглядають специфіку реабілітації ветеранів війни.

Результати. Бойова травма вимагає зміни парадигми реабілітації з «відновлення симетрії» на «управління асиметрією» для запобігання дегенеративним ускладненням опорно-рухового апарату. Виявлено тенденцію до трансформації методів реєстрації руху від суб'єктивного аналізу до їх використання з перетворенням біомеханічних даних на керуючі сигнали для протезів. Обґрунтовано перехід до концепції сприйняття протеза як «нейромеханічного доповнення» організму. Представлені у статті науково-практичні підходи та проблеми мають взаємозв'язок та взаємовплив, що потребує системної інтеграції при формуванні програм відновлення.

Висновки. Модель формування стійкості тіла та патерну ходи ветеранів війни має розглядатись як система факторів, що інтегрована у мультидисциплінарну «тріаду» (фізичний стан, психологічні аспекти, функціональність протеза), що є пріоритетом для розробки персоналізованих протоколів.

Ключові слова: ветерани війни, протезування, хода, статодинамічна стійкість, ампутація, біомеханіка, реабілітація.

POSTURAL STATIC-DYNAMIC STABILITY AND GAIT PATTERNS IN WAR VETERANS USING LOWER-LIMB PROSTHESES: ANALYSIS OF CHALLENGES AND CURRENT TRENDS (REVIEW)

Lytvynenko Yuriy^{1(ABCDEF)}, Pitenko Serhiy^{2(ABEF)}, Kepskeyy Maksym^{3(CEF)}

¹ *Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine*

² *Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine*

³ *Quamichan National Training Centre (Rowing Canada Aviron), Vancouver, Canada*

Author's contribution:

A – Study design; B – Data collection;
C – Statistical analysis; D – Manuscript preparation;
E – Manuscript editing; F – Final approval of manuscript

Abstract

Introduction. The increasing number of war veterans with amputations and the specific nature of combat trauma necessitate a revision of standard rehabilitation models. Irrational movement strategies lead to secondary complications and reduce the quality of life. The accumulated scientific potential requires generalization to develop programs for restoring body stability and gait in war veterans.

The aim of the study is to complete analysis and synthesis of current scientific and practical approaches and issues affecting the development of mechanisms of statodynamic stability and gait patterns in war veterans with lower limb prostheses, as well as to identify of priority areas for the development of personalised rehabilitation protocols within the context of Ukraine's current healthcare system.

Material and methods. An analysis of sources in PubMed, Google Scholar, Web of Science, and ResearchGate databases was conducted. Inclusion criteria: works predominantly from the last 10–15 years focusing on gait biomechanics and balance in individuals with lower-limb prosthetics and addressing the specifics of war veteran rehabilitation.

Results. Combat trauma requires a paradigm shift in rehabilitation from «restoring symmetry» to «asymmetry management» to prevent degenerative complications of the musculoskeletal system. A trend has been identified toward transforming movement registration methods from subjective analysis to their application in converting biomechanical data into control signals for prostheses. The transition to the concept of perceiving a prosthesis as a «neuromechanical augmentation» of the body is justified. The scientific and practical approaches and challenges presented in the article are interconnected and mutually influential, requiring systemic integration in the design of recovery programs.

Conclusions. The model for forming body stability and gait patterns in war veterans should be viewed as a system of factors integrated into a multidisciplinary «triad» (physical status, psychological aspects, and prosthetic functionality), which constitutes a priority for the development of personalized protocols.

Keywords: war veterans, prosthetics, gait, static-dynamic stability, amputation, biomechanics, rehabilitation.

Вступ

Збереження рівноваги тіла людини одне з найважливіших питань науки й практики, яке всебічно вивчається та й для сьогодення лишається актуальною проблемою. В сучасних дослідженнях, зокрема [1], статодинамічна стійкість тіла розглядається крізь призму умов реалізації програми руху людини. Такий підхід зосереджується не стільки на збереженні рівноваги тіла людини в статичних позах та положеннях, хоча і не виключає його, скільки на складних механізмах балансу тіла людини як важливої складової ефективного програмування рухових дій в різних умовах їх реалізації.

Слід відзначити, що регуляція пози, збереження стійкості тіла в останні роки набули неабиякого значення для військових, ветеранів війни та осіб, які були поранені та втратили нижні кінцівки. Враховуючи чутливість питання, точні дані, стосовно втрат нижніх кінцівок за період 2022 – 2025 років, отримати складно. З відкритих джерел відомо, що цей показник становить в межах 50 тис., з тенденцією постійного зростання. У зв'язку з цим абсолютно зрозумілим є те, що комплексу питань з протезування нижніх кінцівок, розробленню реабілітаційних програм тощо приділена неабияка увага, ефективність яких впливає не лише на формування стратегій балансування та збереження рівноваги тіла, а й на біомеханіку локомоцій ветеранів війни та подальшу якість їх життя в цілому.

Літературний аналіз показує, що військові дії у різні історичні періоди, як правило, суттєво активізували дослідницьку діяльність [10,18]. У цьому контексті вивчалися психічні та психолого-фізіологічні стани й відновлення військових [13,36].

Особливу роль завжди було відведено вивченню впливу типу та якості протезування на процеси соціалізації ветеранів війни [11, 33] та формування патерну ходи в нових умовах. При цьому з метою досягнення максимально прийняттого результату не лише медична складова була у центрі уваги дослідників. До вивчення проблеми долучались фахівці з різних сфер (інженерія, психологія, фізична реабілітація, педагогіка, фізична культура, спорт та інші) [19, 48, 55].

У зв'язку з цим важливо зауважити, що протезування ветеранів війни, особливості післяопераційного періоду, їх адаптація до нових умов статодинамічної стійкості та формування патерну ходи, знаходить своє окреме відображення у наукових дослідженнях [10, 36, 42], хоча і базується на вже існуючих науково-практичних досягненнях здобутих, у тому числі, на теренах цивільного середовища [4, 7, 38, 45]. Це пов'язано з тим, що бойова травма відрізняється від цивільної (мінно-вибуховий характер, поєднання з контузійними та посттравматичним стресовим розладом (ПТСР)), що робить стандартні цивільні підходи недостатніми.

Обґрунтованість актуальності цього напрямку не викликає сумніву, адже, як вже зазначалось, фактично йдеться про якість подальшого життя ветеранів війни, оскільки у довгостроковій перспективі сформовані біомеханічно нераціональні рухові стратегії виступають своєрідним пусковим механізмом для розвитку низки вторинних ускладнень для їх здоров'я [13, 22], а відтак ціннісно-гуманістична складова посилюється соціально-економічною доцільністю (йдеться про потенційні витрати коштів

державного бюджету на додаткове позапланове лікування ветеранів війни у майбутній перспективі та вивільнення ресурсів передбачених для програм їх професійного розвитку або інших сфер; некоректний патерн ходи слугує перешкодою для професійної реінтеграції ветеранів війни, що також збільшує соціальне навантаження на державу).

Попри високу значущість цього питання, попередньо проведені нами опитування ветеранів війни з протезованими нижніми кінцівками свідчать про їх переважно низький рівень задоволеності сформованих навичок збереження рівноваги тіла та патерну ходи, що є ознакою суттєвих негативних тенденцій та відповідних майбутніх наслідків.

Наявність суб'єктивного незадоволення серед ветеранів війни результатами реабілітації, попри доступ до сучасних технологій, диктує необхідність перегляду існуючих поглядів. Вирішити це питання неможливо без комплексного розуміння сукупності проблем. Тим більше, що за останні роки накопичено чимало наукових знань, технологій, розробок та підходів. Отже, їх аналіз та узагальнення стане важливим кроком на шляху до усунення прогалин та дієвою передумовою для розробки системних, науково-обґрунтованих та апробованих на практиці підходів формування статодинамічної стійкості тіла та патерну ходи ветеранів війни.

Мета дослідження

Мета роботи – проаналізувати та узагальнити сучасні науково-практичні підходи та проблеми, що впливають на формування механізмів статодинамічної стійкості тіла та патерну ходи ветеранів

війни з протезованими нижніми кінцівками, визначити пріоритетні напрями для розробки персоналізованих реабілітаційних протоколів в умовах сучасної системи охорони здоров'я України.

Матеріал і методи дослідження

Аналіз та узагальнення науково-методичної літератури, Internet джерел та практичного досвіду з проблем дотичних до формування статодинамічної стійкості тіла та патерну ходи ветеранів війни з протезованими нижніми кінцівками.

Відповідно до міжнародних рекомендацій з проведення системного огляду та аналізу джерел було проведено пошук та досліджено понад 500 науково-методичних джерел (за період 1985 – 2025 рр.), зокрема у базах даних PubMed, Google Scholar, Web of Science, Research Gate.

Серед досліджених науково-методичних джерел та публікацій, 52 літературні джерела були вивчені у повнотекстовому форматі. Критеріями включення джерел для аналізу були: наукові праці, опубліковані переважно за останні 10–15 років (з акцентом на новітні технології); дослідження, що фокусуються на біомеханіці ходи та рівновазі осіб з протезованими нижніми кінцівками на рівні стегна та гомілки; роботи, що розглядають специфіку реабілітації саме ветеранів війни та осіб із бойовою травмою.

Критеріями виключення джерел з аналізу були: тези доповідей та анотації без повного тексту статті; дослідження, що стосуються виключно вроджених вад кінцівок; публікації в нерецензованих виданнях або джерела з низьким рівнем доказовості.

Вивчення практичного досвіду з окреслених питань здійснювалось за співпраці з Центром реабілітації клінічної лікарні «Феофанія» Державного управління справами, Відновлювально-оздоровчим центром «OrtoRehab».

Результати дослідження та їх обговорення

Проведений аналіз вказує, що переважна більшість наукових робіт, в яких досліджуються питання формування статодинамічної стійкості тіла та патерну ходи ветеранів війни з протезованими нижніми кінцівками, ґрунтуються на даних отриманих на цивільному контингенті [2, 9, 12, 32, 51].

Значно рідше зустрічаються сучасні наукові дослідження пов'язані з вирішенням цих проблем у ветеранів війни, що в нинішніх умовах українського суспільства є надзвичайно актуальним. І це зрозуміло, адже фахова спільнота сконцентрована, у переважній більшості, на невідкладній допомозі військовим, що водночас сприяє накопиченню відповідними фахівцями практичного досвіду. Формування ж наукової бази знань з цього питання потребує більше часу, перевірки фактів, статистичного обґрунтування тощо.

Такі приклади в історії вже були. Зокрема, після війн у В'єтнамі, проведення США операцій «Іракська свобода» та «Несокрушима свобода» кількість наукових робіт присвячених різним аспектам [10, 11, 19, 36], у тому числі протезуванню військових [13, 18, 33], значно зросла, що дало значний технологічний поштовх.

До речі, саме в цих роботах говориться про необхідність диференціювати військових від цивільних, коли мова йде про формування патерну ходи, що пов'язано

з умовами отриманих травм та факторами, які їх супроводжують.

Загалом, питання, що розглядаються в науковому середовищі, слід умовно поділити на декілька взаємопов'язаних напрямів відповідно до предметів їх дослідження: біомеханіка ходи та забезпечення стійкості тіла, методи реєстрації, аналізу та контролю, технології протезування, фактори, що впливають на процеси відновлення, технології та підходи формування статодинамічної стійкості тіла та патерну ходи.

В умовах сьогодення, зокрема активного наукового та технічного розвитку, названі компоненти мають розглядатись як єдина технологічна система з чіткою їх залежністю один від одного. У цьому контексті важливо розуміти роль та місце кожного з них.

Так, наприклад, ефективну біомеханіку ходи неможливо уявити без забезпечення належної (надійної) статодинамічної стійкості тіла. Вони абсолютно взаємопов'язані – порушення рівноваги тіла вносить відповідні зміни в біомеханіку ходи (як правило негативні компенсації).

Однак при цьому слід усвідомлювати, що протезна хода є невід'ємно асиметричною, про що було зазначено в науковій літературі ще десятиліття тому [4, 8, 39, 48]. І це радше біомеханічна реальність.

При цьому рівень ампутації є одним з найважливіших предикторів функціонального результату, адже існує фундаментальна різниця між реабілітацією пацієнтів з трансфеморальною та транстибіальною ампутаціями (ТФА та ТТА відповідно).

Так чи інакше, біомеханічна неефективність та компенсаторні рухи, необхідні для ходи на протезі,

приводять до значно вищих метаболічних енергетичних витрат порівняно зі здоровою ходою та створюють надмірне навантаження на інші частини тіла [15]. Це підвищене споживання енергії може обмежувати автономність та знижувати швидкість ходи, особливо з ТФА [23]. І це при тому, що у пацієнтів з ТТА на ранніх етапах реабілітації через підвищений ризик падіння та відчуття невпевненості [27, 46] неампутована кінцівка може підтримувати до 60% ваги тіла [16]. А тому, як зазначають [16, 37], цей дисбаланс є ключовим фактором, що призводить до довгострокових ускладнень, що пов'язано з порушенням діяльності систем контролю рівноваги тіла, фундаментальними змінами у розподілі сил та їх моментів у суглобах та, як наслідок, формуванням низки компенсаторних рухів [21, 40]. Змінюються не лише рухи в суглобах залишкової кінцівки, але й у здоровій нозі, тазі та хребті [53].

Досвід клінічної практики це підтверджує – з'являються небажані латеральні нахили тулуба, мають прояви такі явища як «стрибаюча» хода, значні нахили тазу (найбільш характерно для сагітальної та фронтальної площин), змінюється постава тощо.

Важливіше у цьому аспекті те, що змінені біомеханічні патерни не є доброякісними у довгостроковій перспективі, і це одностайна думка практикуючих фахівців та науковців [12, 53]. Вони є пусковим механізмом для розвитку низки вторинних ускладнень. Постійні асиметричні навантаження безпосередньо пов'язані з підвищеним ризиком розвитку остеоартриту в суглобах здорової кінцівки (кульшовому, колінному, гомілковостопному) та

хребта, а також хронічним болем в попереку [22, 35].

Аналізуючи отримані дані та досвід фахівців, ми можемо констатувати, що у такий спосіб формується своєрідне хибне коло. Первинна біомеханічна асиметрія, спричинена ампутацією, змушує тіло розвивати компенсаторні стратегії. Ці стратегії призводять до аномального та надмірного навантаження на здорову кінцівку та хребет. З часом це перевантаження викликає дегенеративні зміни та біль, які, у свою чергу, ще більше погіршують якість ходи та підвищують її енергетичну вартість. Це створює низхідну спіраль погіршення функції та якості життя.

Отже, на нашу думку, головна мета повинна полягати не просто в тому, щоб «навчити тримати рівновагу та ходити», а в тому, щоб якомога раніше розірвати це хибне коло, мінімізуючи компенсаторні рухи та сприяючи більш симетричному навантаженню. І саме тому ампутацію слід розглядати не як локальну проблему втраченої кінцівки, а як стан, що впливає на весь організм, вимагаючи комплексного підходу, який включає зміцнення м'язів кора, збереження здоров'я неураженої кінцівки, підтримку серцево-судинної системи тощо.

Разом з тим можна побачити, що існує фундаментальна суперечність між клінічною та інженерною метою відновлення «нормальної», симетричної ходи та біомеханічною реальністю – локомоція людини з ампутацією є постійно асиметричною, і це доведений, загальновідомий факт [28, 37, 45].

Десятиліття досліджень підтверджують, що асиметрія в навантаженні, часових параметрах та кінематиці є стійкою особливістю протезної ходи, що безпосередньо

призводить до довгострокових вторинних проблем зі здоров'ям, про які вже зазначалось. Це веде до висновку, що прагнення до ідеальної симетрії може бути помилковим ідеалом. А тому, суто гіпотетично можна передбачити, що більш клінічно ефективна парадигма може зміститися з «відновлення симетрії» на «управління асиметрією». Метою стає досягнення найбільш стабільного, ефективного та найменш шкідливого асиметричного патерну ходи з першочерговим фокусом на захисті контралатеральної кінцівки та поперекового відділу хребта.

Для досягнення цієї мети особливо важливим є подальше формування бази знань з цього питання, перехід від якісної до кількісної біомеханічної та обґрунтованої оцінки [55]. Особливо це важливо в сучасних умовах технологічного розмаїття підходів протезування, що мають різний ефект та вплив на формування біомеханічних стратегій статодинамічної стійкості тіла та патерну ходи ветеранів війни. Отже, такий підхід не повинен викликати жодних сумнівів, адже спостережний аналіз ходи є надзвичайно суб'єктивним, оскільки залежить від досвіду клініциста [14], і його результати важко оцінити (наприклад з метою подальшого порівняння та створення певних моделей) або послідовно задокументувати.

Але, на жаль, є й інша складова цього питання – системи безмаркерного відеоаналізу [20, 52], тредміли з вбудованою тензометрією [17], високоточні системи захвату руху (на базі камери інфрачервоного випромінювання для 3D захоплення руху, тензометричні платформи, електроміографія (ЕМГ)) [54, 55], є досить дорогими (враховується вартість створення лабораторії –

відповідне приміщення та його оснащення, апаратурне обладнання, програмне забезпечення, щорічне обслуговування тощо), вимагають чимало часу для проведення обстеження та висококваліфікованого персоналу, а тому для рутинного клінічного використання на місцях не знаходять широкого розповсюдження [55].

Однак необхідно зауважити, що протягом 2025 року на теренах України поступово почали з'являтися такі технологічні лабораторії, як правило, при сучасних реабілітаційних центрах, що є важливою позитивною тенденцією в контексті розуміння фахівцями складності проблеми та необхідності її вирішення шляхом застосування найбільш просунутих технологій.

Більш доступними вважаються технології реєстрації та аналізу руху на базі інерційних датчиків (ІД) [41, 44, 47]. Хоча і цей підхід також створює ризик виникнення ситуації, коли клініцисти будуть перевантажені складними біомеханічними даними, які вони, як правило, не навчені інтерпретувати [55].

Складність звітів, що генеруються, може бути бар'єром для переважної більшості клініцистів. Отже, простіші та доступніші системи поширять цю проблему на значно ширшу та потенційно менш спеціалізовану клінічну аудиторію. Це вказує на критичну майбутню потребу не лише в кращих датчиках, а й у складному програмному забезпеченні з вбудованим ШІ, яке зможе перетворювати необроблені біомеханічні дані на прості, дієві клінічні рекомендації [6]. А, отже, досягнення в галузі ШІ, вже у найближчій перспективі може впливати на вирішення цієї проблеми.

Доцільність використання високотехнологічних систем може

полягати й в іншому, адже аналіз ходи еволюціонує від діагностичного інструменту до терапевтичного та керуючого вхідного сигналу [5]. Спочатку такі складні системи використовувалися для діагностики відхилень ходи постфактум. Поява систем реального часу, зокрема надтонкі датчики тиску [30], ІД та ЕМГ, перетворює аналіз ходи на невід'ємну частину самого протеза [49, 50]. Сучасні дослідження описують використання ІД та ЕМГ для прогнозування наміру йти та використання сигналів ЕМГ для безперервного міоелектричного керування активним протезом [49].

По суті такий підхід є дієвим парадигматичним зсувом: дані більше не призначені лише для клініциста; вони стають керуючим вхідним сигналом для пристрою в реальному часі. Таким чином, стирається межа між діагностикою та терапією, створюється система із замкнутим циклом, де власні біологічні сигнали користувача, виміряні в реальному часі, безпосередньо модулюють поведінку його біонічної кінцівки. Однак, поки це слід розглядати як перспективу та, на жаль, малодоступну технологію для широкого загалу [5, 49].

Попри це, протез не має сприйматись у якості пасивного інструменту. Проведені нами попередні дослідження з ветеранами війни (проводились відеореєстрація з подальшим кількісним та якісним біомеханічним аналізом, результати яких будуть представлені у наших подальших публікаціях) вказують на те, що протез має розглядатись у якості активного компоненту реабілітаційного процесу, що вводить нові біомеханічні обмеження.

В даному контексті мова йде про використання протезів різного типу. Наприклад, використання пасивних

протезів (активна генерація енергії відсутня) змушує користувача компенсувати це, що призводить до підвищених метаболічних витрат та, в окремих випадках, травм від перенапруження [34].

Узагальнюючи опис цієї проблеми можна сформулювати такий причинно-наслідковий ланцюг: ампутація → втрата біологічної генерації енергії → залежність від пасивного протеза → посилена компенсаторна робота м'язів → вищі метаболічні витрати та травми від перенапруження. Власне кажучи, це і стало своєрідним обґрунтуванням необхідності розробки активних та нейроінтегрованих протезів [31, 49].

У якості прикладу можна навести пристрої, такі як C-Leg та Genium, що використовують вбудовані датчики (наприклад, гіроскопи, акселерометри) для визначення положення користувача та фази ходи в реальному часі, відповідно регулюючи гідравлічний або магнітореологічний опір [28, 31]. Їхня ключова та найбільш клінічно значуща перевага полягає в радикальному підвищенні безпеки людини [31], створенні значних функціональних переваг через можливість ходити з більшою швидкістю та кращою симетрією, легше долати нерівні поверхні, схили та сходи, а також ефективніше виконувати завдання повсякденного життя [34, 51], оскільки такі протези звільняють користувача від необхідності свідомо контролювати кожен крок, що робить ходу більш природною та менш енерговитратною. І такі мікропроцесорні протези мають вже не одне технологічне покоління (використовують більш досконалі сенсори та складніші алгоритми управління), з незмінною ключовою концепцією — «оптимізована фізіологічна хода», що має на меті

максимально наблизити біомеханіку ходи з протезом до природної [51].

Слід зазначити, що найглибший вплив таких мікропроцесорних протезів може бути не стільки біомеханічним, скільки психологічним, у тому числі з метою більшої залученості у реабілітаційний процес та готовність розширювати функціональні межі [43], що надзвичайно важливо для ветеранів війни, з чим погоджується низка дослідників [12, 24].

І дійсно, еволюція протезних технологій, скажімо перехід від механічних до мікропроцесорних колінних модулів, кардинально змінила парадигму реабілітації та очікування щодо результатів відновлення ходи.

Однак справедливо буде зазначити, що докази переваг, наприклад, так названих «активних стоп» (використовуються двигуни для забезпечення чистої позитивної роботи, активно відштовхуючи користувача вперед наприкінці фази опори) над високоякісними «пасивними стопами» все ще є неоднозначними, їхні клінічні переваги не є універсально встановленими і значною мірою залежать від правильного налаштування для конкретного користувача.

Не зважаючи на це, можна констатувати, що найбільш передові рубежі в протезуванні більше не є суто проблемами машинобудування. Вони існують на перетині хірургії, нейронауки та робототехніки.

Одним з найбільш сучасних підходів у протезуванні вважається остеоінтеграція – хірургічна техніка, що передбачає імплантацію металевого штифта безпосередньо в залишкову кістку, до якого кріпиться зовнішній протез [25]. Цей підхід вже досить активно та успішно запроваджується в

Україні для ветеранів війни, зокрема в одному з найбільш сучасних реабілітаційних центрів «TYTANOVI RENAV».

В науковій літературі звертають увагу й на такі передові нейронні інтерфейси як таргетна м'язова реіннервація (хірургічна процедура, яка перенаправляє перерізані нерви з ампутованої кінцівки до залишкових м'язів з метою керування міоелектричним протезом) та регенеративні периферичні нервові інтерфейси (передбачає обгортання перерізаного нерва невеликим м'язовим трансплантатом, що посилює нейронні сигнали для більш надійного керування протезом) [6, 49, 50].

Створення системи тактильного зворотного зв'язку також вважається надзвичайно перспективним напрямом. У зв'язку з чим, дослідники розробляють технології, які використовують датчики (наприклад, датчики тиску) в протезній стопі для надання сенсорного зворотного зв'язку користувачеві через вібраційні двигуни або інші стимулятори на кукці [5, 54].

Існують також підходи прямої нейронної стимуляції, що передбачають імплантацію електродів, які безпосередньо стимулюють периферичні нерви або навіть соматосенсорну кору, дозволяючи користувачеві «відчувати» дотик, тиск і температуру, від свого протеза [5]. Розробка «е-дерми» або електронної шкіри є ключовою частиною цих досліджень [6, 49].

Це демонструє чітку тенденцію: замість того, щоб просто припасовувати пристрій до людини, зараз модифікується власна фізіологія людини (нерви, м'язи, кістки) для створення більш безшовного та інтегрованого інтерфейсу з пристроєм. Тобто формується абсолютно новий

погляд – від «заміни кінцівки» до «нейромеханічного доповнення».

Очевидно, що за такими інноваційними технологіями майбутнє протезування, що значно вплине на зміст програм формування ефективної статодинамічної стійкості тіла та патерну ходи ветеранів війни.

Як вже зазначалось раніше, окремі передові технології протезування ветеранів війни вже успішно застосовуються в найбільш сучасних медичних центрах України та країн партнерів. І хоча ця тенденція не є масовою, практикуючі фахівці [29] вже наголошують на необхідності створення протоколів та відповідному їх змістовному наповненні з урахуванням застосованих технологічних рішень. Наразі це питання є невирішеним.

Разом з тим існує й інша проблема. Незважаючи на швидкий технологічний прогрес у дослідницьких лабораторіях, впровадження цих технологій у широку клінічну практику є повільним і пов'язаним з проблемами, насамперед вартістю та необхідністю надійних доказів додаткової користі для відшкодування, зокрема страховими компаніями та іншими організаціями, що здійснюють фінансування. Логічно прогнозувати, що такі компанії, скоріш за все, вимагатимуть високоякісних доказів клінічної користі для обґрунтування високої вартості нової технології, а це створює значний бар'єр. Тобто, новий пристрій повинен бути не тільки технологічно досконалішим, але й демонструвати кількісно вимірюване покращення результатів (наприклад, зменшення болю, підвищення мобільності, зниження довгострокових витрат на охорону здоров'я), щоб бути комерційно життєздатним.

У зв'язку з цим можна попередньо передбачити, що найбільшою перешкодою для наступного покоління біонічних кінцівок може бути не технічна, а економічна та бюрократична, що в умовах українських реалій може стати суттєвою перешкодою в контексті ефективної та швидкої допомоги ветеранам війни, які втратили нижні кінцівки.

Коротко представлені підходи, технологічні рішення та особливості протезування мають один з найбільш вагомих факторів впливу на формування статодинамічної стійкості тіла та патерну ходи ветеранів війни.

Поряд із технологічною складовою чи не вирішального значення набувають психологічні наслідки травматичної ампутації у ветеранів війни [36].

Військові з ампутацією, особливо внаслідок травми, мають високі показники супутніх психологічних станів, включаючи депресію, тривожність та ПТСР. Ці стани часто переплітаються з хронічним болем, порушенням образу тіла, фантомним болем, функціональними обмеженнями, що сприяють депресії та тривожності. Психологічний дистрес може посилити сприйняття болю, замикаючи цикл [43]. Це лише підкреслює, що лікування цих проблем ізольовано, ймовірно, буде невдалим. І, до речі, аналогічної думки дотримуються практикуючі фахівці. Відповідно ефективна модель реабілітації ветеранів війни повинна бути справді мультидисциплінарною, одночасно вирішуючи проблеми біомеханіки, управління болем та психічного здоров'я.

Таким чином, аналіз цих факторів виявляє глибокий взаємозв'язок між фізичним, психологічним та функціональним станом ветерана війни,

формуєчи своєрідну «тріаду». Високий рівень болю негативно впливає на психологічний стан. Поганий психологічний стан знижує мотивацію до використання протеза та тренувань. Недостатнє використання протеза та низька активність призводять до м'язової слабкості, погіршення стану кукси (в залежності від типу протезу) та незадоволеності протезом, що, у свою чергу, посилює депресію. Цей негативний цикл підкреслює, що втручання, спрямоване лише на один аспект (наприклад, тільки на біомеханіку ходи) без урахування болю та психічного здоров'я ветеранів війни, має високий ризик невдачі.

У цьому контексті протез відіграє подвійну роль. З одного боку, це функціональний інструмент, що відновлює здатність ходити. З іншого — це потужний психосоціальний об'єкт, ключовий для нового образу тіла ветерана війни. Тому слід зазначити, що задоволеність протезом є одним із ключових предикторів позитивної психологічної адаптації. І навпаки, проблеми з протезом (погане прилягання, дискомфорт, обмежена функціональність) є постійним, фруструючим нагадуванням про втрату, що сприяє депресії [36].

Системоутворюючим базисом описаної моделі є врахування військового контексту, що інтегрований в контр змісту технології (від компонентів програми реабілітації до специфіки та кваліфікації персоналу, який працює з ветеранами війни). В таких формах моделей спостерігається не пряме запозичення, а наступність знань, здобутих на матеріалі цивільного контингенту з їх відповідною адаптацією до потреб військових.

Загалом військова реабілітація часто є більш інтенсивною, тривалою та надається фахівцями з досвідом роботи зі складними політравмами. Вона також зазвичай включає надійний доступ до психологічної підтримки, наставників-рівних та фінансової/професійної допомоги.

Прикладами таких вдалих підходів слугують спеціальні клінічні практичні рекомендації для цієї категорії осіб, що розроблені за підтримки Департаменту у справах ветеранів США та Міністерство оборони США.

Статистичні дані та досвід Ізраїлю також показують високотехнологічну, довготривалу систему військової реабілітації, вдосконалену протягом десятиліть конфліктів, яка зараз масштабується та швидко впроваджує нові технології, такі як використання віртуальної та доповненої реальності [3], систем біологічного зворотного зв'язку [14] та ШІ [6].

До прикладу, ізраїльські дослідницькі установи, такі як Тель-Авівський університет, активно займаються дослідженнями в галузі біомедичної інженерії, що стосуються протезування та регенерації тканин, за тісної співпраці з американськими установами, такими як NYU Langone, для впровадження передових хірургічних технік, як-от остеоінтеграція, та новітніх протезів для поранених солдатів Армії оборони Ізраїлю.

Ізраїльські компанії також впроваджують інновації в цій галузі, розробляючи екзоскелети та інші допоміжні пристрої, що сприяють покращенню статодинамічної стійкості тіла та формуванню патерну ходи.

Стандарт догляду за пораненими військовими є комплексним, залучаючи ортопедів, протезистів, психологів,

фізичних та ерготерапевтів, а також соціальних працівників. Значний акцент робиться на психологічній підтримці при ПТСР та реінтеграції в суспільство, часто через адаптивні види спорту, загалом активно застосовуються засоби фізичної культури і спорту [25, 26].

Отже, доречно зауважити, що такі підходи не обмежуються лише досягненням незалежної ходи, а орієнтовані на проактивне включення стратегії для пом'якшення довгострокових пошкоджень з самого початку. Це включає інтенсивний фокус на зміцненні м'язів кора та абдукторів стегна, захисті здорової кінцівки та використанні об'єктивного аналізу ходи для раннього виявлення та корекції ледь помітних, але шкідливих рухових патернів, значну психосоціальну підтримку тощо.

В умовах сьогодення спостерігається активний розвиток цього напрямку й в Україні. Прикладами можуть бути одні з провідних та сучасних центрів – «Superhumans Center», Національна мережа реабілітаційних центрів RECOVERY, Національний реабілітаційний центр «Unbroken», Шведсько-український медичний центр «Angelholm», Реабілітаційний центр «Аурум», Спортивно-реабілітаційний центр «TYTANOVI REHAB» тощо.

Однак, проведений нами аналіз, свідчить, що питання ефективного навчання ходи, формування надійної статодинамічної стійкості тіла ветеранів війни з протезованими нижніми кінцівками все ще потребує подальшого вивчення. На превеликий жаль, існуючі сучасні передові технології не є доступні широкому загалу. Більш того, з практичного досвіду стає відомо, що навіть застосування найбільш сучасних технологічних рішень не гарантує

досягнення бажаного результату. Тому існує потреба у створенні уніфікованих та, на їх основі, індивідуальних протоколів роботи з ветеранами війни, з урахуванням фактично застосованих технологій в кожному конкретному випадку.

Висновки

Профіль ветерана війни суттєво відрізняється від цивільних пацієнтів через комбінацію складних бойових травм, наявність супутніх станів та високу мотивацію до повернення до активного життя, що вимагає ветеран-центричного підходу в питаннях реабілітації.

У центрі реабілітаційного процесу мають перебувати якість життя ветеранів війни та їхня повноцінна реінтеграція в суспільство. Належна статодинамічна стійкість тіла та раціонально сформований патерн ходи є невід'ємними складниками відновлення впевненості у власному тілі та критичними чинниками успішної соціалізації й професійної реалізації особистості.

Існує необхідність переходу від ідеалізованої мети «відновлення симетрії локомоцій» до клінічно ефективної стратегії «управління асиметрією». Це дозволить розірвати «хибне коло» біомеханічних компенсацій та запобігатиме розвитку вторинних дегенеративних ускладнень опорно-рухового апарату. Саме тому сучасний протез слід розглядати як «нейромеханічне доповнення» організму користувача, ефективність якого залежить від впровадження об'єктивних методів кількісного аналізу та розробки уніфікованих протоколів (перехід від суб'єктивної оцінки до доказової реабілітації).

Разом з тим застосування найсучасніших технологій без належного

методичного супроводу не тільки не гарантує відновлення функцій, а й несе ризику відтермінованих негативних ефектів та вторинних ускладнень, що є загрозою довгострокового зростання витрат на лікування ветеранів війни та перешкоджає їх ефективній професійній реінтеграції.

Формування статодинамічної стійкості тіла та патерну ходи ветеранів війни з протезованими нижніми кінцівками через систему факторів, інтегрованих у мультидисциплінарну «тріаду» (фізичний стан, психологічні аспекти, функціональність протеза), є перспективним напрямом для розробки обґрунтованих персоналізованих реабілітаційних протоколів та пріоритетним гуманістичним і соціально-економічним завданням держави.

Перспективи подальших досліджень

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці та впровадженні уніфікованих цифрових протоколів оцінки функціонального стану ветеранів війни, які б інтегрували біомеханічні, фізіологічні та психологічні показники; вивчені довгострокового впливу різних типів протезних систем на збереження здоров'я опорно-рухового апарату ветеранів війни та профілактику вторинних ускладнень; створенні вітчизняних інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для фахівців із фізичної терапії, ерготерапії та протезування.

Література:

1. Литвиненко, Ю. В. (2018). *Регуляція пози спортсменів у складних умовах статодинамічної стійкості тіла*. Луцьк: Вежа-Друк. 324 с.
2. Abou, L., Fliflet, A., Zhao, L., Du, Y., & Rice, L. (2022). The effectiveness of exercise interventions to improve gait and balance in individuals with lower limb amputations: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Rehabilitation*, 36(7), 857–872. <https://doi.org/10.1177/02692155221086204>.
3. Arazpour, M., Keshavarzi, F., & Gard, S. A. (2025). The effects of virtual reality environment simulations on balance and gait rehabilitation in persons with lower extremity amputation. *Prosthetics and Orthotics International*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1097/PXR.0000000000000428>.
4. Baker, P. A., & Hewison, S. R. (1990). Gait recovery pattern of unilateral lower limb amputees during rehabilitation. *Prosthetics and Orthotics International*, 14(2), 80–84. <https://doi.org/10.3109/03093649009080327>
5. Bush & Co. (n.d.). Revolutionary advancements in prosthetics: Overcoming limitations and restoring abilities. Retrieved November 14, 2025, from <https://www.bushco.co.uk/news/latest-tech-in-prosthetics-and-what-it-does.html>
6. Chopra, S., & Emran, T. B. (2024). Advances in AI-based prosthetics development: Editorial. *International Journal of Surgery*, 110(8), 4538–4542. <https://doi.org/10.1097/JS9.0000000000001573>
7. De Marchis, C., Ranaldi, S., Varrecchia, T., Serrao, M., Castiglia, S. F., Tatarelli, A., Ranavolo, A., Draicchio, F., Lacquaniti, F., & Conforto, S. (2022). Characterizing the gait of people with different types of amputation and prosthetic components through multimodal measurements: A methodological perspective. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 3, 804746. <https://doi.org/10.3389/fresc.2022.804746>

8. Dingwell, J. B., Davis, B. L., & Frazier, D. M. (1996). Use of an instrumented treadmill for real-time gait symmetry evaluation and feedback in normal and trans-tibial amputee subjects. *Prosthetics and Orthotics International*, 20(2), 101–110. <https://doi.org/10.3109/03093649609164426>
9. Donelan, J. M., Kram, R., & Kuo, A. D. (2001). Mechanical and metabolic determinants of the preferred step width in human walking. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 268(1480), 1985–1992. <https://doi.org/10.1098/rspb.2001.1761>
10. Dougherty, P. J., McFarland, L. V., Smith, D. G., Esquenazi, A., Blake, D. J., & Reiber, G. E. (2010). Multiple traumatic limb loss: A comparison of Vietnam veterans to OIF/OEF servicemembers. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 47(4), 333–348. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2009.04.0043>
11. Dougherty, P. J., McFarland, L. V., Smith, D. G., & Reiber, G. E. (2014). Bilateral transfemoral/trans-tibial amputations due to battle injuries: A comparison of Vietnam veterans with Iraq and Afghanistan servicemembers. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 472(10), 3010–3016. <https://doi.org/10.1007/s11999-014-3534-9>
12. Ebrahimzadeh, M. H., & Hariri, S. (2009). Long-term outcomes of unilateral transtibial amputations. *Military Medicine*, 174(6), 593–597. <https://doi.org/10.7205/MILMED-D-02-8907>
13. Epstein, R. A., Heinemann, A. W., & McFarland, L. V. (2010). Quality of life for veterans and servicemembers with major traumatic limb loss from Vietnam and OIF/OEF conflicts. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 47(4), 373–386. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2009.03.0023>
14. Escamilla-Nunez, R., Michelini, A., & Andrysek, J. (2020). Biofeedback systems for gait rehabilitation of individuals with lower-limb amputation: A systematic review. *Sensors*, 20(6), 1628. <https://doi.org/10.3390/s20061628>
15. Esquenazi, A. (2014). Gait analysis in lower-limb amputation and prosthetic rehabilitation. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 25(1), 153–167. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2013.09.006>
16. Fontes Filho, C. H. D. S., Laett, C. T., Gavilão, U. F., Campos, J. C., Jr., Alexandre, D. J. A., Cossich, V. R. A., & Sousa, E. B. (2021). Bodyweight distribution between limbs, muscle strength, and proprioception in traumatic transtibial amputees: A cross-sectional study. *Clinics*, 76, e2486. <https://doi.org/10.6061/clinics/2021/e2486>
17. Fortune, E., Crenshaw, J., Lugade, V., & Kaufman, K. R. (2017). Dynamic assessment of center of pressure measurements from an instrumented AMTI treadmill with controlled precision. *Medical Engineering & Physics*, 42, 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2017.01.002>
18. Gailey, R., McFarland, L. V., Cooper, R. A., Czerniecki, J., Gambel, J. M., Hubbard, S., Maynard, C., Smith, D. G., Raya, M., & Reiber, G. E. (2010). Unilateral lower-limb loss: Prosthetic device use and functional outcomes in servicemembers from Vietnam war and OIF/OEF conflicts. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 47(4), 317–331. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2009.04.0039>
19. Gaunaud, I., Gailey, R., Springer, B., Symsack, A., Clemens, S., Lucarevic, J., Kristal, A., Bennett, C., Isaacson, B., Agrawal, V., Applegate, B., & Pasquina, P. (2020). The effectiveness of the DoD/VA mobile device outcomes-based rehabilitation program for high functioning service members and veterans with lower limb amputation. *Military Medicine*, 185(Suppl. 1), 480–489. <https://doi.org/10.1093/milmed/usz201>
20. Heitzmann, D., Rist, V., Block, J., Alimusaj, M., & Wolf, S. (2022). Markerless versus marker-based motion analysis in subjects with lower limb amputation: A case series. *Gait & Posture*, 97, 95–96.
21. Highsmith, M. J., Andrews, C. R., Millman, C., Fuller, A., Kahle, J. T., Klenow, T. D., Lewis, K. L., Bradley, R. C., & Orriola, J. J. (2016). Gait training interventions for lower extremity amputees: A systematic literature review. *Technology and Innovation*, 18(2–3), 99–113. <https://doi.org/10.21300/18.2-3.2016.99>

22. Highsmith, M. J., Goff, L. M., Lewandowski, A. L., Farrokhi, S., Hendershot, B. D., Hill, O. T., Rábago, C. A., Russell-Espósito, E., Orriola, J. J., & Mayer, J. M. (2019). Low back pain in persons with lower extremity amputation: A systematic review of the literature. *The Spine Journal*, *19*(3), 552–563. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2018.08.011>
23. Hood, S., Ishmael, M. K., Gunnell, A., Foreman, K. B., & Lenzi, T. (2020). A kinematic and kinetic dataset of 18 above-knee amputees walking at various speeds. *Scientific Data*, *7*(1), 150. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0494-7>
24. Horgan, O., & MacLachlan, M. (2004). Psychosocial adjustment to lower-limb amputation: A review. *Disability and Rehabilitation*, *26*(14–15), 837–850. <https://doi.org/10.1080/09638280410001708869>
25. Ynetnews. (n.d.). In first, Israeli hospital opens new amputee rehabilitation clinic. Retrieved August 30, 2025, from https://www.ynetnews.com/topics/Tzur_Gueta
26. The Times of Israel. (n.d.). Israeli virtual reality game helps dozens of new war amputees reduce phantom pain. Retrieved October 10, 2025, from <https://www.timesofisrael.com/israeli-virtual-reality-game-helps-dozens-of-new-war-amputees-reduce-phantom-pain/>
27. Kahle, J. T., Miro, R. M., Ho, L. T., Porter, M. R., Lura, D. J., Carey, S. L., Lunseth, P., Swanson, A. E., & Highsmith, M. J. (2021). Effect of transfemoral prosthetic socket interface design on gait, balance, mobility, and preference: A randomized clinical trial. *Prosthetics and Orthotics International*, *45*(4), 304–312. <https://doi.org/10.1097/PXR.0000000000000013>
28. Kaufman, K. R., Frittoli, S., & Frigo, C. A. (2012). Gait asymmetry of transfemoral amputees using mechanical and microprocessor-controlled prosthetic knees. *Clinical Biomechanics*, *27*(5), 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2011.11.011>
29. Kim, J. H., Kim, Y. R., Han, M. H., Lee, J. Y., Kim, J. S., Kang, Y. C., Yoon, S. J., Chang, Y., Lee, G., & Cho, N. S. (2023). Development of a digital healthcare management system for lower-extremity amputees: A pilot study. *Healthcare*, *11*(1), 106. <https://doi.org/10.3390/healthcare11010106>
30. Liu, N., Liu, X., Su, Z., & Wang, J. (2024). Research on the gait phase analysis method of femoral amputation patients based on the thin film pressure sensor. *Wireless Personal Communications*, *137*(2), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11460-1>
31. Ma, X., Zhang, X., & Xu, J. (2024). Robotic leg prosthesis: A survey from dynamic model to adaptive control for gait coordination. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2024.3356561>
32. McDonald, C. L., Westcott-McCoy, S., Weaver, M. R., Haagsma, J., & Kartin, D. (2021). Global prevalence of traumatic non-fatal limb amputation. *Prosthetics and Orthotics International*, *45*(2), 105–114. <https://doi.org/10.1177/0309364620972258>
33. McFarland, L. V., Hubbard Winkler, S. L., Heinemann, A. W., Jones, M., Esquenazi, A., & Reiber, G. E. (2010). Unilateral upper-limb loss: Satisfaction and prosthetic-device use in veterans and servicemembers from Vietnam and OIF/OEF conflicts. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, *47*(4), 299–316. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2009.03.0027>
34. Mileusnic, M. P., Rettinger, L., Highsmith, M. J., & Hahn, A. (2021). Benefits of the Genium microprocessor controlled prosthetic knee on ambulation, mobility, activities of daily living and quality of life: A systematic literature review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, *16*(5), 453–464. <https://doi.org/10.1080/17483107.2019.1648570>
35. Miller, R. H., Krupenevich, R. L., Pruziner, A. L., Wolf, E. J., & Schnall, B. L. (2017). Medial knee joint contact force in the intact limb during walking in recently ambulatory service members with unilateral limb loss: A cross-sectional study. *PeerJ*, *5*, e2960. <https://doi.org/10.7717/peerj.2960>
36. Murray, C., Havlin, H., & Molyneaux, V. (2024). Considering the psychological experience of amputation and rehabilitation for military veterans. *Disability and Rehabilitation*, *46*(6), 1053–1072. <https://doi.org/10.1080/09638288.2023.2182915>

37. Olaya Mira, N., Gómez Hernández, L. M., Viloría Barragán, C., Monsalve Montes, M., & Soto Cardona, I. C. (2025). Biomechanical and kinematic gait analysis in lower limb amputees: Cross-sectional study. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, *12*, e67022. <https://doi.org/10.2196/67022>
38. Porter, D., & Roberts, V. C. (1989). A review of gait assessment in the lower limb amputee: Part 2: Kinetic and metabolic analysis. *Journal of Biomedical Engineering*, *11*(1), 3–11. <https://doi.org/10.1177/026921558900300212>
39. Prince, F., Allard, P., Therrien, R., & McFadyen, B. J. (1992). Running gait impulse asymmetries in below-knee amputees. *Prosthetics and Orthotics International*, *16*(1), 19–24. <https://doi.org/10.3109/03093649209164303>
40. Ranaldi, S., De Marchis, C., Serrao, M., Ranavolo, A., Draicchio, F., Lacquaniti, F., & Conforto, S. (2023). Characterization of prosthetic knees through a low-dimensional description of gait kinematics. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *20*(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01160-5>
41. Rattanakoch, J., Samala, M., Limroongreungrat, W., Guerra, G., Tharawadeepimuk, K., Nanbancha, A., Niamsang, W., Kerdsonnuek, P., & Suwanmana, S. (2023). Validity and reliability of inertial measurement unit (IMU)-derived 3D joint kinematics in persons wearing transtibial prosthesis. *Sensors*, *23*(3), 1738. <https://doi.org/10.3390/s23031738>
42. Reiber, G. E., McFarland, L. V., Hubbard, S., Maynard, C., Blough, D. K., Gambel, J. M., & Smith, D. G. (2010). Servicemembers and veterans with major traumatic limb loss from Vietnam war and OIF/OEF conflicts: Survey methods, participants, and summary findings. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, *47*(4), 275–297. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2010.01.0009>
43. Roşca, A. C., Baciu, C. C., Burtăverde, V., & Mateizer, A. (2021). Psychological consequences in patients with amputation of a limb: An interpretative-phenomenological analysis. *Frontiers in Psychology*, *12*, 537493. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.537493>
44. Seel, T., Raisch, J., & Schauer, T. (2014). IMU-based joint angle measurement for gait analysis. *Sensors*, *14*(4), 6891–6909. <https://doi.org/10.3390/s140406891>
45. Seth, M., Coyle, P. C., Pohlig, R. T., Beisheim, E. H., Horne, J. R., Hicks, G. E., & Sions, J. M. (2022). Gait asymmetry is associated with performance-based physical function among adults with lower-limb amputation. *Physiotherapy Theory and Practice*, *38*(13), 3108–3118. <https://doi.org/10.1080/09593985.2021.1990449>
46. Shi, Q. Q., Yick, K. L., Wu, J., Huang, X., Tse, C. Y., & Chan, M. K. (2023). A scientometric analysis and visualization of prosthetic foot research work: 2000 to 2022. *Bioengineering*, *10*(10), 1138. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10101138>
47. Simonetti, E., Villa, C., Bascou, J., Vannozzi, G., Bergamini, E., & Pillet, H. (2020). Gait event detection using inertial measurement units in people with transfemoral amputation: A comparative study. *Medical & Biological Engineering & Computing*, *58*(3), 461–470. <https://doi.org/10.1007/s11517-019-02098-4>
48. Skinner, H. B., & Effeney, D. J. (1985). Gait analysis in amputees. *American Journal of Physical Medicine*, *64*(2), 82–89.
49. Stafford, N. E., Gonzalez, E. B., & Ferris, D. P. (2024). Walking ankle biomechanics of individuals with transtibial amputations using a prescribed prosthesis and a portable bionic prosthesis under myoelectric control. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *32*, 3036–3047. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2024.3440257>
50. Valette, R., Gonzalez-Vargas, J., & Dosen, S. (2023). The impact of walking on the perception of multichannel electrotactile stimulation in individuals with lower-limb amputation and able-bodied participants. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *20*(1), 108. <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01234-4>
51. Varrecchia, T., Serrao, M., Rinaldi, M., Ranavolo, A., Conforto, S., De Marchis, C., Simonetti, A., Poni, I., Castellano, S., Silvetti, A., Tatarelli, A., Fiori, L., Conte, C., & Draicchio, F. (2019). Common and specific gait patterns in people with varying anatomical levels of lower limb amputation and different

- prosthetic components. *Human Movement Science*, 66, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.03.008>
52. Wade, L., Needham, L., McGuigan, P., & Bilzon, J. (2022). Applications and limitations of current markerless motion capture methods for clinical gait biomechanics. *PeerJ*, 10, e12995. <https://doi.org/10.7717/peerj.12995>
53. Wasser, J. G., Vincent, K. R., Herman, D. C., & Vincent, H. K. (2020). Potential lower extremity amputation-induced mechanisms of chronic low back pain: Role for focused resistance exercise. *Disability and Rehabilitation*, 42(25), 3713–3721. <https://doi.org/10.1080/09638288.2019.1610507>
54. Wentink, E. C., Schut, V. G., Prinsen, E. C., Rietman, J. S., & Veltink, P. H. (2014). Detection of the onset of gait initiation using kinematic sensors and EMG in transfemoral amputees. *Gait & Posture*, 39(1), 391–396. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.08.008>
55. Yuan, X., Sparling, T., Carlisle, D., McGavin, S., Riggelman, T., Cuevas, E., Ojha, S., Smith, D. G., Sheehan, R., & Kim, G. (2025). Integrating gait analysis systems in clinical rehabilitation settings for individuals with lower limb amputation: A narrative review. *PM&R*, 17(8), e91030. <https://doi.org/10.7759/cureus.91030>.

Автори засвідчують про відсутність конфлікту інтересів.

Інформація про авторів:

Литвиненко Юрій,

доктор наук з фізичного виховання і спорту, професор,
професор кафедри фізично виховання та здоров'я,
Київський національний університет технологій та дизайну,
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-1137-9952>
E-mail: ylitvinenko.biomechanics@gmail.com

Пітенко Сергій,

старший викладач кафедри фізичного виховання і педагогіки спорту,
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка,
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-5502-1365>
E-mail: s.pitenko@kubg.edu.ua

Кепський Максим,

тренер з академічного веслування Національного тренувального центру «Quamichan»
у складі Rowing Canada Avignon, консультант у сфері спорту вищих досягнень із
спортивною біомеханіки та фізіології спорту, м. Ванкувер, Канада
E-mail: info@sport-performance-consulting.com

Отримано: 26.11.2025

Прийнято: 15.01.2026

Опубліковано: 26.03.2026

Литвиненко, Ю., Пітенко, С., & Кепський, М. (2026). Статодинамічна стійкість тіла та патерн ходи ветеранів війни з протезованими нижніми кінцівками: аналіз проблем та сучасних тенденцій (огляд літератури). *Спортивна наука та здоров'я людини*, 1(15), 119–135. <https://doi.org/10.28925/2664-2069.2026.110>.