

©Г. О. Стельмах <https://orcid.org/0000-0003-2992-3274>

©І. І. Камишна <https://orcid.org/0000-0002-4483-1856>

©Т. Г. Бакалюк <https://orcid.org/0000-0002-7619-0264>

©Н. Р. Макаручук <https://orcid.org/0000-0001-5196-1619>

©Ю. П. Фоменко <https://orcid.org/0009-0008-4973-1492>

*Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України,
Тернопіль, Україна*

РОЛЬ КОЛІННИХ МОДУЛІВ У ВІДНОВЛЕННІ СИМЕТРІЇ ХОДИ У ПАЦІЄНТІВ ПІСЛЯ ТРАНСФЕМОРАЛЬНОЇ АМПУТАЦІЇ

РЕЗЮМЕ. Трансфеморальна ампутація (ТФА) є одним із найскладніших видів ампутацій, що призводить до значних біомеханічних і функціональних порушень, зокрема асиметрії ходи, болю в попереку, розвитку остеоартриту контрлатеральної кінцівки та підвищеного ризику падінь. Вибір протезного колінного модуля відіграє вирішальну роль у процесі реабілітації пацієнтів після ТФА, оскільки саме він визначає якість, безпеку та енерго-ефективність ходи. Сучасні мікропроцесорні колінні модулі (МКМ) є технологічним проривом у протезуванні, забезпечуючи автоматичне регулювання опору залежно від фази ходи, швидкості руху та умов поверхні, що сприяє відновленню більш природного патерну ходи.

Мета – систематизувати, проаналізувати та критично оцінити наявні наукові дані щодо впливу різних типів протезних колінних модулів, зокрема мікропроцесорних, на відновлення симетрії ходи у пацієнтів після трансфеморальної ампутації.

Матеріал і методи. Проведено аналітичний огляд літератури з використанням баз даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar. Для пошуку застосовано ключові слова: prosthetic rehabilitation, gait after amputation, knee module, transfemoral amputation, gait biomechanics, prosthetic gait adaptation. Відібрано дослідження, які вивчали біомеханіку ходи, нейромоторну адаптацію, просторово-часові параметри тощо.

Результати. Аналіз досліджень показав, що застосування МКМ, таких як C-Leg та Genium, сприяє підвищенню безпеки, стабільності та симетрії ходи. Ці модулі знижують енергетичні витрати, покращують контроль рухів, зменшують навантаження на здорову кінцівку та ймовірність падінь. Окрім біомеханічних переваг, використання МКМ позитивно впливає на психологічний стан, сприйняття образу тіла та якість життя пацієнтів. Водночас існує потреба у подальших дослідженнях, спрямованих на вивчення довгострокового впливу МКМ на рівень активності та участі в соціальному житті.

Висновки. Мікропроцесорні колінні модулі є ефективним засобом для покращення симетрії ходи та функціональної незалежності у пацієнтів після трансфеморальної ампутації. Їх застосування сприяє зменшенню компенсаторних рухів, підвищенню стабільності та якості життя, що підтверджує доцільність широкого впровадження МКМ у клінічну практику протезування та реабілітації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: протезна реабілітація; хода після ампутації; колінний модуль; трансфеморальна ампутація; біомеханіка ходи; адаптація до ходи з протезом.

Вступ. Ампутація нижньої кінцівки вище коліна (трансфеморальна ампутація) є одним із найсерйозніших фізичних та функціональних порушень, що призводить до значної інвалідизації пацієнтів [1].

Трансфеморальна ампутація (ТФА) – це подія, що змінює життя та може вплинути на здатність людини виконувати кілька функцій, пов'язаних із самостійним життям. Вибір відповідного протезного компонента для пацієнтів із ТФА є критично важливою змінною в реабілітації та складним клінічним рішенням, яке включає кілька факторів, таких як задоволення конкретних потреб для досягнення оптимального функціонування [2].

Сама ампутація кінцівки неминуче призводить до порушення симетрії ходи [3]. Цей підви-

щений рівень асиметрії ходи несе значні довгострокові ризики для здоров'я, що є клінічно важливим аспектом протезування.

Асиметричний патерн ходи може спричиняти: згинальні контрактури залишкової кінцівки, розвиток остеоартриту на здоровій (контрлатеральній) кінцівці, частішу появу болю в попереку та підвищений ризик падіння [4]. Такі наслідки можуть сприяти зниженню фізичної функції та якості життя [5]. Таким чином, відновлення симетричної ходи є ключовим завданням реабілітації для профілактики вторинних ускладнень.

Центральним елементом, що визначає якість та ефективність ходи, є протезний колінний модуль. Традиційно використовувані механічні та гідравлічні колінні модулі мають обмеження

щодо адаптації до змінної швидкості та нерівних поверхонь. Поява мікропроцесорних колінних модулів (МКМ), які використовують датчики та мікрокомп'ютери для динамічного регулювання опору [6], обіцяє значне покращення функціональності та, зокрема, відновлення природного патерну ходи.

Мета статті – систематизація, аналіз та критична оцінка наявних наукових даних і досліджень, присвячених впливу різних типів протезних колінних модулів на відновлення симетрії ходи у пацієнтів після трансфеморальної ампутації.

Матеріал і методи дослідження. Методологія огляду ґрунтувалася на цілеспрямованому пошуку у ключових міжнародних базах даних (зокрема, PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar). Джерела відбирали за допомогою комбінацій таких основних ключових слів: протезна реабілітація, хода після ампутації, колінний модуль, трансфеморальна ампутація, біомеханіка ходи, адаптація до ходи з протезом.

Людина, яка перенесла ТФА, стикається з певними труднощами, такими як підвищені потреби в енергії для пересування, проблеми з рівновагою та обмеження у здатності виконувати повсякденну діяльність [7]. Адекватний вибір протезних компонентів, особливо колінного модуля, має велике значення для забезпечення оптимальних результатів реабілітації. Окрім відновлення фізіологічної біомеханіки, коліно повинно забезпечувати максимальну безпеку та стабільність.

Протезна хода передбачає використання компенсаторних рухових стратегій, включаючи зміни в біомеханіці ходи та адаптацію в механізмах нейронного контролю, що приймаються центральною нервовою системою [8].

Після операції люди з ампутацією повинні пройти реабілітаційний етап та значну підготовку до ходьби [9], щоб отримати здатність ходити самостійно та безпечно з протезом [10]. Люди з монолатеральною ампутацією зазвичай застосовують серію компенсаторних рухових стратегій, що включають протезну сторону та контрлатеральну здорову кінцівку, а також посилене залучення таза і тулуба [11]. Фактично, протезна хода відображає поєднання відхилень від нормальної ходи та адаптивних і компенсаторних рухів, що диктуються функціями залишкових кінцівок. З точки зору моторного контролю, під час процесу реабілітації люди з ампутацією повинні адаптувати свої моделі ходьби до нових фізичних умов, і ця адаптація може призвести до змін у тому, як центральна нервова система (ЦНС) контролює рух. Ампутація нижньої кінцівки призводить до значної нейронної реорганізації в ЦНС, головним чином через втрату сенсомоторної функції, спричи-

нену ампутацією [12], та нового біомеханічного стану, викликаного типом ампутації та використаним протезом.

Два фактори, що впливають на ходу людей з ампутацією, – це рівень ампутації [13] та тип протезів [14, 15]. Щодо першого фактора, хода у людей з трансфеморальною ампутацією здається більш асиметричною, ніж у людей з транстібіальною ампутацією, зі збільшенням компенсаторних стратегій, які з часом можуть завдати шкоди людям [16]. Щодо типу протезів, то в останні роки протези покращилися в дизайні, матеріалах та технологіях [17, 18], ставши більш ефективними з точки зору ефективності ходьби, мінімізації асиметрії та зменшення компенсаторних рухів.

Вибір відповідного колінного модуля має ключове значення для пацієнтів із ТФА, адже сьогодні існує широкий спектр його конструкцій. Також правильний вибір протезного колінного суглоба важливий для безпеки та якості рухів. Підбір компонентів колінного механізму в остаточному протезі повинен ґрунтуватися на розмірі змін кукси стегна та залежати від здатності контролювати протез у осіб у фронтальній площині з короткими куксами кінцівок [4].

На сьогоднішній день мікропроцесорні колінні модулі (МКМ) добре зарекомендували себе як пристрої для обслуговування пацієнтів з ТФА. Різні принципи функціонування колінних модулів (наприклад, гідравлічні блоки, магнітореологічна рідина), відповідають за різні рівні продуктивності, які ці МКМ пропонують користувачам [19].

C-Leg (Otto Bock Healthcare) – це гідравлічний протезний пристрій та найбільш вивчений протез у клінічних дослідженнях на сьогоднішній день. На відміну від більшості інших МКМ, C-Leg використовує налаштування стійки за замовчуванням, що означає, що він завжди забезпечує високий опір згинанню у стійці для підтримання ваги тіла, якщо його контроль стійки не вимкнено, що відображає його найвищий пріоритет – забезпечення безпеки [20]. Дослідження Mileusnic MP et al. показало, що з використанням МКМ C-Leg такі колінні модулі значно підвищують безпеку пацієнтів, їхнє пересування, мобільність, продуктивність у повсякденних справах та якість життя [15].

Протези колінного суглоба з мікропроцесорним керуванням оснащені системою сенсорів і мікрокомп'ютером, які постійно відстежують рухи під час фази опори та переносу ноги. Завдяки цьому такий протез автоматично адаптується до змін швидкості та ритму ходьби, реагує на зовнішні умови й допомагає відтворювати більш природну, наближену до фізіологічної, ходу [21].

Переваги вдосконалених гідравлічних колінних протезів з мікропроцесорним керуванням

добре відомі та неодноразово підтверджені. Колінний суглоб Genium був представлений у 2011 році та містить удосконалену концепцію керування, включаючи додаткові датчики та вдосконалені алгоритми, що забезпечують низку нових функцій для людей з ТФА. Було проведено систематичний огляд для оцінки впливу колінного модуля Genium на ходьбу, мобільність, активність повсякденного життя та якість життя, порівняно зі стандартними мікропроцесорними колінними протезами [15].

Дослідження Şen El et al. показало, що використання мікропроцесорного керованого протезного колінного суглоба (МПК) забезпечує значне покращення рухових можливостей, якості життя та повсякденної діяльності у пацієнтів з трансфеморальними аномаліями, а також покращує сприйняття образу їхнього тіла та депресивні симптоми. Оцінка активності, участі та психосоціальних аспектів є важливою при визначенні цільової популяції після ТФА для використання МКМ. Окрім біомеханічних переваг, які він забезпечує, цей МКМ слід розглядати для відповідних пацієнтів з ампутаціями з метою реінтеграції цих осіб у суспільство [22].

Кількісна оцінка та характеристика ходи осіб з протезом є важливим елементом для покращення розробки нових та ергономічних протезних пристроїв, а також для оптимізації програм реабілітації [23, 24]. Тим не менш, різноманітність методологій, що використовуються для оцінки протезної ходи, обмежує порівняння результатів різних досліджень та ускладнює визначення спільних рекомендацій. Кількісна оцінка протезної ходи повинна бути зосереджена на показниках ефективної та екологічної ходи, таких як традиційні параметри ходи, рівень асиметрії ходи, споживання метаболізму та обсяг компенсаторної активації м'язів, але оцінка такого неоднорідного сценарію вимагає нових дослідницьких методологій [25].

Низка досліджень висвітлили деякі важливі особливості протезної ходи, включаючи стабільність, просторово-часові параметри ходи та симетрію, збираючи відповідну інформацію за допомогою скороченого набору датчиків [26, 27]. Однак, через гетерогенну природу протезних компонентів, типу реабілітації, досвіду використання протезів та самих характеристик ампутації, мультимодальний підхід до такого аналізу ходи міг би пролити світло на деякі важливі особливості, пов'язані з цими численними факторами [28, 29], тим самим підтримуючи клінічну практику.

Нейромеханічний аналіз ходи, що об'єднує інформацію про біомеханічні аспекти та аспекти нейронного контролю, використовує переваги

цього мультимодального підходу. Це додає до браку досліджень, що включають ЕМГ-аналіз контралатеральної кінцівки, який дає чітке уявлення про те, як ЦНС адаптується до ходьби з протезом [30] на додаток до змін, що виникають на рівні залишкової мускулатури [31]. Загалом, кінематичні, кінетичні та поверхневі ЕМГ-знахідки ходи відображають компенсаторні зусилля, що розвиваються людьми з ампутацією для захисту м'яких тканин протеза та допомагають впоратися з новим станом протеза.

Отже, незважаючи на постійний технологічний прогрес у конструкції протезів, який привів до зменшення компенсаторних рухів та підвищення їх сприйняття користувачами, все ще необхідне глибоке розуміння численних факторів, що впливають на протезну ходу [8].

Майбутні дослідження повинні визначити можливість додаткову функціональну цінність МКМ, зосереджуючись зокрема на активності та участі [2].

Висновок. Асиметрична хода є значною проблемою для пацієнтів після трансфеморальної ампутації, що призводить до втоми, болю та підвищеного ризику падінь. Мікропроцесорні колінні модулі (МКМ) є інноваційною технологією, яка потенційно може покращити симетрію ходи завдяки активному контролю фази опори та адаптивному реагуванню на зміни швидкості та навантаження. Покращення симетрії ходи при використанні МКМ пов'язане з більш фізіологічним контролем згинання та розгинання колінного суглоба, кращим розподілом навантаження між кінцівками та підвищеною стабільністю під час фази опори. Впровадження МКМ у практику протезування може мати значний позитивний вплив на якість життя пацієнтів після трансфеморальної ампутації, сприяючи більш ефективній та безпечній ходьбі.

Подальші дослідження необхідні для вивчення довгострокових впливів використання МКМ на симетрію ходи, їхньої ефективності у різних групах пацієнтів та порівняння різних моделей МКМ.

Джерела фінансування. Власні кошти авторів.

Внесок авторів:

Г. О. Стельмах – проведення огляду літератури та написання тексту;

І. І. Камишна – формування концепції дослідження;

Т. Г. Бакалюк – розробка ідеї та дизайну дослідження;

Н. Р. Макачук – виконання аналізу та обговорення результатів;

Ю. П. Фоменко – критичний аналіз і синтез літературних джерел.

Конфлікт інтересів. Відсутній.

ЛІТЕРАТУРА

1. Myers M., Chauvin B. J. Above-the-Knee Amputations. [Updated 2023 Jun 12]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544350/>
2. Stevens P. M., Wurdeman S. R. Prosthetic Knee Selection for Individuals with Unilateral Transfemoral Amputation: A Clinical Practice Guideline. *J Prosthet Orthot.* 2019.No.31(1).P.2–8.DOI:10.1097/JPO.0000000000000214
3. Gait asymmetry is associated with performance-based physical function among adults with lower-limb amputation / Seth M. et al. *Physiotherapy theory and practice.* 2022. No. 38 (13). P. 3108–3118. DOI: 10.1080/09593985.2021.1990449
4. Symmetry function in gait pattern analysis in patients after unilateral transfemoral amputation using a mechanical or microprocessor prosthetic knee / Kowal M. et al. *Journal of neuroengineering and rehabilitation.* 2021. No. 18 (1). P. 9. DOI: 10.1186/s12984-021-00810-w
5. Sørensen I. L., Berg G. V. Facilitators and Barriers That Transfemoral Amputees Experience in Their Everyday Life: A Norwegian Qualitative Study. *Rehabil Res Pract.* 2022. No. 8;2022 P. 2256621. DOI: 10.1155/2022/2256621.
6. Fuenzalida Squella S. A., Kannenberg A., Brandão Benetti Â. Enhancement of a prosthetic knee with a microprocessor-controlled gait phase switch reduces falls and improves balance confidence and gait speed in community ambulators with unilateral transfemoral amputation. *Prosthet Orthot Int.* 2018. No. 42 (2). P. 228–235. DOI: 10.1177/0309364617716207
7. Predicting ambulatory energy expenditure in lower limb amputees using multi-sensor methods / Ladlow P. et al. *PLoS One.* 2019. No. 14 (1). P. e0209249. DOI: 10.1371/journal.pone.0209249
8. Characterizing the Gait of People With Different Types of Amputation and Prosthetic Components Through Multimodal Measurements: A Methodological Perspective / De Marchis C. et al. *Front Rehabil Sci.* 2022. No. 3. P. 804746. DOI: 10.3389/fresc.2022.804746
9. Relationship between models of care and key rehabilitation milestones following unilateral transtibial amputation: a national cross-sectional study / Heberton J. et al. *Physiotherapy.* 2019. No. 105 (4). P. 476–482. DOI: 10.1016/j.physio.2018.11.307
10. Ülger Ö., Yıldırım Şahan T., Çelik S. E. A systematic literature review of physiotherapy and rehabilitation approaches to lower-limb amputation. *Physiother Theory Pract.* 2018.No.34(11).P.821–834.DOI:10.1080/09593985.2018.1425938
11. Spinal, pelvic, and hip movement asymmetries in people with lower-limb amputation: Systematic review / Devan H. et al. *J Rehabil Res Dev.* 2015. No. 52 (1). P. 1–19. DOI:10.1682/JRRD.2014.05.0135
12. Mechanisms of cortical reorganization in lower-limb amputees / Chen R. et al. *J Neurosci.* 1998. No. 18 (9). P. 3443–3450. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.18-09-03443.1998
13. Transfemoral amputations: the effect of residual limb length and orientation on gait analysis outcome measures / Bell J. C. et al. *J Bone Joint Surg Am.* 2013. No. 95 (5). P. 408–414. DOI: 10.2106/JBJS.K.01446
14. Kaufman K. R., Bernhardt K. A., Symms K. Functional assessment and satisfaction of transfemoral amputees with low mobility (FASTK2): A clinical trial of microprocessor-controlled vs. non-microprocessor-controlled knees. *Clin Biomech (Bristol).* 2018. No. 58. P. 116–122. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2018.07.012
15. Benefits of the Genium microprocessor controlled prosthetic knee on ambulation, mobility, activities of daily living and quality of life: a systematic literature review / Mileusnic M. P. et al. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 2021. No.16(5).P.453–464.DOI:10.1080/17483107.2019.1648570
16. Sivapuratharasu B., Bull A. M. J., McGregor A. H. Understanding Low Back Pain in Traumatic Lower Limb Amputees: A Systematic Review. *Arch Rehabil Res Clin Transl.* 2019. No. 1 (1–2). P. 100007. DOI: 10.1016/j.arrct.2019.100007
17. Physiological parameters analysis of transfemoral amputees with different prosthetic knees / Li S. et al. *Acta Bioeng Biomech.* 2019. No. 21(3). P. 135–142.
18. Assessing the Relative Contributions of Active Ankle and Knee Assistance to the Walking Mechanics of Transfemoral Amputees Using a Powered Prosthesis / Ingraham K. A. et al. *PLoS One.* 2016. No. 11(1). P. e0147661. DOI: 10.1371/journal.pone.0147661
19. The influence of a user-adaptive prosthetic knee across varying walking speeds: A randomized cross-over trial / Prinsen E. C. et al. *Gait Posture.* 2017. No. 51. P. 254–260. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2016.11.015
20. The quality of life analysis of knee prosthesis with complete microprocessor control in trans-femoral amputees / Saglam Y. et al. *Acta Orthop Traumatol Turc.* 2017.No.51(6).P.466–469.DOI:10.1016/j.aott.2017.10.009
21. The effects of microprocessor prosthetic knee use in early rehabilitation: A pilot randomized controlled trial / Morgan S. J. et al. *PMR.* 2025. No. 17.(4). P. 371–383. DOI: 10.1002/pmrj.13321
22. Effects of microprocessor-controlled prosthetic knees on self-reported mobility, quality of life, and psychological states in patients with transfemoral amputations / Şen E. İ. et al. *Acta Orthop Traumatol Turc.* 2020.No.54(5).P.502–506.DOI:10.5152/j.aott.2020.19269
23. Schafer Z. A., Perry J. L., Vanicek N. A personalised exercise programme for individuals with lower limb amputation reduces falls and improves gait biomechanics: A block randomised controlled trial. *Gait Posture.* 2018. No. 63. P. 282–289. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.04.030
24. Mohanty R. K., Mohanty R. C., Sabut S. K. A systematic review on design technology and application of polycentric prosthetic knee in amputee rehabilitation. *Phys Eng Sci Med.* 2020. No. 43 (3). P. 781–798. DOI: 10.1007/s13246-020-00882-3
25. Price M. A., Beckerle P., Sup F. C. Design Optimization in Lower Limb Prostheses: A Review. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2019. No. 27 (8). P. 1574–1588. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2927094
26. Inertial sensor-based measures of gait symmetry and repeatability in people with unilateral lower limb amputation / Clemens S. et al. *Clin Biomech (Bristol).* 2020. No.72.P.102–107.DOI:10.1016/j.clinbiomech.2019.12.007
27. Estimation of the body center of mass velocity during gait of people with transfemoral amputation from

force plate data integration / Lansade C. et al. *Clin Biomech (Bristol)*. 2021. No. 88. P. 105423. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2021.105423

28. Esquenazi A. Gait analysis in lower-limb amputation and prosthetic rehabilitation. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2014. No. 25(1). P. 153–167. DOI: 10.1016/j.pmr.2013.09.006

29. Wanamaker A. B., Andridge R. R., Chaudhari A. M. When to biomechanically examine a lower-limb amputee: A systematic review of accommodation times. *Prosthet Orthot Int*. 2017. No. 41(5). P. 431–445. DOI: 10.1177/0309364616682385

30. Muscular activity comparison between non-amputees and transfemoral amputees during normal transient-state walking speed / Mehryar P. et al. *Med Eng Phys*. 2021. No. 95. P. 39–44. DOI: 10.1016/j.medengphys.2021.07.004

31. Huang S., Ferris D. P. Muscle activation patterns during walking from transtibial amputees recorded within the residual limb-prosthetic interface. *J Neuroeng Rehabil*. 2012. No. 9 P. 55. Published 2012 Aug 10. DOI: 10.1186/1743-0003-9-55

REFERENCES

1. Myers M, Chauvin BJ. Above-the-Knee Amputations. [Updated 2023 Jun 12]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan–. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544350/>

2. Stevens PM, Wurdeman SR. Prosthetic Knee Selection for Individuals with Unilateral Transfemoral Amputation: A Clinical Practice Guideline. *J Prosthet Orthot*. 2019;31(1):2–8. DOI: 10.1097/JPO.0000000000000214

3. Seth M, Coyle PC, Pohlig RT, Beisheim EH, Horne JR, Hicks GE, Sions JM. Gait asymmetry is associated with performance-based physical function among adults with lower-limb amputation. *Physiother Theory Pract*. 2022;38(13):3108–18. DOI: 10.1080/09593985.2021.1990449

4. Kowal M, Winiarski S, Gieysztor E, Kotcz A, Walewicz K, Borowicz W, et al. Symmetry function in gait pattern analysis in patients after unilateral transfemoral amputation using a mechanical or microprocessor prosthetic knee. *J Neuroeng Rehabil*. 2021;18(1):9. DOI: 10.1186/s12984-021-00810-w

5. Sørensen IL, Berg GV. Facilitators and barriers that transfemoral amputees experience in their everyday life: a Norwegian qualitative study. *Rehabil Res Pract*. 2022;2022:2256621. DOI: 10.1155/2022/2256621

6. Fuenzalida Squella SA, Kannenberg A, Brandão Benetti Â. Enhancement of a prosthetic knee with a microprocessor-controlled gait phase switch reduces falls and improves balance confidence and gait speed in community ambulators with unilateral transfemoral amputation. *Prosthet Orthot Int*. 2018;42(2):228–35. DOI: 10.1177/0309364617716207

7. Ladlow P, Nightingale TE, McGuigan MP, Bennett AN, Phillip RD, Bilzon JJJ. Predicting ambulatory energy expenditure in lower limb amputees using multi-sensor methods. *PLoS One*. 2019;14(1):e0209249. DOI: 10.1371/journal.pone.0209249

8. De Marchis C, Ranaldi S, Varrecchia T, et al. Characterizing the gait of people with different types of amputation and prosthetic components through multimodal measurements: a methodological perspective. *Front Rehabil Sci*. 2022;3:804746. DOI: 10.3389/fresc.2022.804746

9. Hebenton J, Scott H, Seenan C, Davie-Smith F. Relationship between models of care and key rehabilitation milestones following unilateral transtibial amputation: a

national cross-sectional study. *Physiotherapy*. 2019;105(4):476–82. DOI: 10.1016/j.physio.2018.11.307

10. Ülger Ö, Yıldırım Şahan T, Çelik SE. A systematic literature review of physiotherapy and rehabilitation approaches to lower-limb amputation. *Physiother Theory Pract*. 2018;34(11):821–34. DOI: 10.1080/09593985.2018.1425938

11. Devan H, Carman A, Hendrick P, Hale L, Ribeiro DC. Spinal, pelvic, and hip movement asymmetries in people with lower-limb amputation: systematic review. *J Rehabil Res Dev*. 2015;52(1):1–19. DOI: 10.1682/JRRD.2014.05.0135

12. Chen R, Corwell B, Yaseen Z, Hallett M, Cohen LG. Mechanisms of cortical reorganization in lower-limb amputees. *J Neurosci*. 1998;18(9):3443–50. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.18-09-03443.1998

13. Bell JC, Wolf EJ, Schnall BL, Tis JE, Tis LL, Potter BK. Transfemoral amputations: the effect of residual limb length and orientation on gait analysis outcome measures. *J Bone Joint Surg Am*. 2013;95(5):408–14. DOI: 10.2106/JBJS.K.01446

14. Kaufman KR, Bernhardt KA, Symms K. Functional assessment and satisfaction of transfemoral amputees with low mobility (FASTK2): a clinical trial of microprocessor-controlled vs non-microprocessor-controlled knees. *Clin Biomech (Bristol)*. 2018;58:116–22. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2018.07.012

15. Mileusnic MP, Rettinger L, Highsmith MJ, Hahn A. Benefits of the Genium microprocessor-controlled prosthetic knee on ambulation, mobility, activities of daily living and quality of life: a systematic literature review. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2021;16(5):453–64. DOI: 10.1080/17483107.2019.1648570

16. Sivapuratharasu B, Bull AMJ, McGregor AH. Understanding low back pain in traumatic lower limb amputees: a systematic review. *Arch Rehabil Res Clin Transl*. 2019;1(1–2):100007. DOI: 10.1016/j.arrct.2019.100007

17. Li S, Cao W, Yu H, Meng Q, Chen W. Physiological parameters analysis of transfemoral amputees with different prosthetic knees. *Acta Bioeng Biomech*. 2019;21(3):135–42.

18. Ingraham KA, Fey NP, Simon AM, Hargrove LJ. Assessing the relative contributions of active ankle and knee assistance to the walking mechanics of transfemoral amputees using a powered prosthesis. *PLoS One*. 2016;11(1):e0147661. DOI: 10.1371/journal.pone.0147661

19. Prinsen EC, Nederhand MJ, Sveinsdóttir HS, et al. The influence of a user-adaptive prosthetic knee across varying walking speeds: a randomized cross-over trial. *Gait Posture*. 2017;51:254–60. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2016.11.015
20. Sağlam Y, Gulenc B, Birisik F, Ersen A, Yilmaz Yalcinkaya E, Yazicioglu O. The quality of life analysis of knee prosthesis with complete microprocessor control in transfemoral amputees. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2017;51(6):466–9. DOI: 10.1016/j.aott.2017.10.009
21. Morgan SJ, Friedly JL, Nelson IK, Rosen RE, Humbert AT, Hafner BJ. The effects of microprocessor prosthetic knee use in early rehabilitation: a pilot randomized controlled trial. *PM R*. 2025;17(4):371–83. DOI: 10.1002/pmrj.13321
22. Şen El, Aydın T, Buğdaycı D, Kesiktaş FN. Effects of microprocessor-controlled prosthetic knees on self-reported mobility, quality of life, and psychological states in patients with transfemoral amputations. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2020;54(5):502–6. DOI: 10.5152/j.aott.2020.19269
23. Schafer ZA, Perry JL, Vanicek N. A personalised exercise programme for individuals with lower limb amputation reduces falls and improves gait biomechanics: a block randomised controlled trial. *Gait Posture*. 2018;63:282–9. DOI:10.1016/j.gaitpost.2018.04.030
24. Mohanty RK, Mohanty RC, Sabut SK. A systematic review on design technology and application of polycentric prosthetic knee in amputee rehabilitation. *Phys Eng Sci Med*. 2020;43(3):781–98. DOI: 10.1007/s13246-020-00882-3
25. Price MA, Beckerle P, Sup FC. Design optimization in lower limb prostheses: a review. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2019;27(8):1574–88. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2927094
26. Clemens S, Kim KJ, Gailey R, Kirk-Sanchez N, Kristal A, Gaunaud I. Inertial sensor-based measures of gait symmetry and repeatability in people with unilateral lower limb amputation. *Clin Biomech (Bristol)*. 2020;72:102–7. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2019.12.007
27. Lansade C, Bonnet X, Marvisi N, Facione J, Villa C, Pillet H. Estimation of the body center of mass velocity during gait of people with transfemoral amputation from force plate data integration. *Clin Biomech (Bristol)*. 2021;88:105423. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2021.105423
28. Esquenazi A. Gait analysis in lower-limb amputation and prosthetic rehabilitation. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2014;25(1):153–67. DOI: 10.1016/j.pmr.2013.09.006
29. Wanamaker AB, Andridge RR, Chaudhari AM. When to biomechanically examine a lower-limb amputee: a systematic review of accommodation times. *Prosthet Orthot Int*. 2017;41(5):431–45. DOI: 10.1177/0309364616682385
30. Mehryar P, Shourijeh MS, Rezaeian T, et al. Muscular activity comparison between non-amputees and transfemoral amputees during normal transient-state walking speed. *Med Eng Phys*. 2021;95:39–44. DOI: 10.1016/j.medengphy.2021.07.004
31. Huang S, Ferris DP. Muscle activation patterns during walking from transtibial amputees recorded within the residual limb-prosthetic interface. *J Neuroeng Rehabil*. 2012;9:55. DOI: 10.1186/1743-0003-9-55

H. O. Stelmakh, I. I. Kamyshna, T. H. Bakaliuk, N. R. Makarchuk, Yu. P. Fomenko

Ivan Horbachevsky Ternopil National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Ternopil, Ukraine

THE ROLE OF KNEE MODULES IN RESTORING GAIT SYMMETRY IN PATIENTS AFTER TRANSFEMORAL AMPUTATION

SUMMARY. Transfemoral amputation (TFA) is one of the most complex types of amputation, leading to significant biomechanical and functional impairments, including gait asymmetry, low back pain, development of osteoarthritis of the contralateral limb, and an increased risk of falls. The choice of prosthetic knee module plays a decisive role in the rehabilitation process of patients after TFA, as it determines the quality, safety, and energy efficiency of gait. Modern microprocessor knee modules (MPKM) are a technological breakthrough in prosthetics, providing automatic resistance adjustment depending on the gait phase, speed of movement, and surface conditions, which contributes to the restoration of a more natural gait pattern.

The aim – to systematize, analyze, and critically evaluate existing scientific data on the impact of different types of prosthetic knee modules, in particular microprocessor-controlled ones, on the restoration of gait symmetry in patients after transfemoral amputation.

Material and Methods. An analytical review of the literature was conducted using the PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases. The following keywords were used for the search: prosthetic rehabilitation, gait after amputation, knee module, transfemoral amputation, gait biomechanics, prosthetic gait adaptation. Studies were selected that examined gait biomechanics, neuromotor adaptation, spatiotemporal parameters, and functional outcomes of MCM use.

Results. Analysis of the studies showed that the use of KMMs such as C-Leg and Genium contributes to increased safety, stability, and symmetry of gait. These modules reduce energy expenditure, improve movement control, reduce the load on the healthy limb, and reduce the likelihood of falls. In addition to biomechanical benefits, the use of MCMs

Огляди літератури, оригінальні дослідження, погляд на проблему, випадок з практики, короткі повідомлення

has a positive effect on the psychological state, body image perception, and quality of life of patients. At the same time, there is a need for further research aimed at studying the long-term impact of MCMs on the level of activity and participation in social life.

Conclusions. Microprocessor knee modules are an effective means of improving gait symmetry and functional independence in patients after transfemoral amputation. Their use contributes to a reduction in compensatory movements, increased stability, and quality of life, confirming the feasibility of widespread implementation of MKM in clinical prosthetics and rehabilitation practice.

KEY WORDS: prosthetic rehabilitation; gait after amputation; knee module; transfemoral amputation; gait biomechanics; adaptation to walking with a prosthesis.

Отримано 11.10.2025

Електронна адреса для листування: bakalukth@tdmu.edu.ua