

СИСТЕМИ ЗВОРОТНОГО БІОЛОГІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ У ПАЦІЄНТІВ З АМПУТАЦІЄЮ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

©Ю. В. Завіднюк, О. О. Шевчук, І. Р. Мисула, Т. Г. Бакалюк, В. Ю. Завіднюк

*Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського
Міністерства охорони здоров'я України*

РЕЗЮМЕ. У користувачів протезів спостерігаються значні зміни в біомеханічних показниках ходи, це залежить від рівня ампутації та значною мірою від комплектуючих елементів протеза. Завдяки активному поширенню комп'ютерних технологій та методів збору й обробки даних, системи зворотного біологічного зв'язку для покращення перенавчання ходи у користувачів протезів стали значно доступнішими.

Мета – провести огляд сучасних наукових досліджень щодо застосування систем зворотного біологічного зв'язку у пацієнтів після ампутації та визначення перспективних методів для включення в рутинні стратегії фізичної терапії та реабілітації в цілому.

Зоровий і соматосенсорний зворотний зв'язок вважаються критичними для ходи. Ампутація порушує рухові та пропріоцептивні функції, що змушує людей з ампутацією більше покладатися на візуальний зворотний зв'язок для утримання рівноваги та здійснення кроків. Пристрої зворотного зв'язку, які використовувалися в багатьох дослідженнях, були різними, включаючи візуальні, слухові, тактильні та комбіновані типи, більшість з них мали принаймні певний позитивний ефект на параметри ходи в учасників з ампутацією нижньої кінцівки.

Висновки. Використання технологій зворотного зв'язку, які побудовані на активації та тренуванні зорового, слухового, пропріорецепторного аналізаторів, є сучасними та ефективними методами реабілітації порушень балансу та ходи у пацієнтів після ампутації нижньої кінцівки. Особливо перспективними є розробки, котрі застосовують вібротактильний зворотний зв'язок, та комбіновані системи, котрі задіюють декілька каналів сенсорної інформації – роботизовані комплекси та віртуальна реальність. Доведено, що застосування реабілітаційних методик із системою зворотного біологічного зв'язку мають позитивний ефект на параметри балансу, рівноваги, забезпечують впевненість користувача протеза при ходьбі в складних умовах, зменшують страх та ризик падіння, покращують якість життя.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ампутація; реабілітація; біологічний зворотний зв'язок; протезування.

Вступ. У користувачів протезів спостерігаються значні зміни в біомеханічних показниках ходи, це залежить від рівня ампутації та значною мірою від комплектуючих елементів протеза.

Існує велика різноманітність підходів до покращення якості та ефективності навчання ходи на протезі, порівняльна ефективність яких не завжди добре встановлена. Для прийняття клінічних рішень, які сприяють оптимальним результатам для пацієнтів, важливо розглянути широкий спектр доступних варіантів реабілітаційних утручань, в тому числі перспективних інноваційних методів. Завдяки активному поширенню комп'ютерних технологій та методів збору й обробки даних, системи зворотного біологічного зв'язку для покращення перенавчання ходи у користувачів протезів стали значно доступнішими. Враховуючи швидкі темпи розвитку цієї галузі, у цій статті представлено огляд літератури щодо доступних технологій зворотного зв'язку для встановлення та тренування правильного патерну ходи на протезах нижніх кінцівок.

Мета – провести огляд сучасних наукових досліджень щодо застосування систем зворотного біологічного зв'язку у пацієнтів після ампутації та визначення перспективних методів для включення в рутинні стратегії фізичної терапії та реабілітації в цілому.

Зоровий і соматосенсорний зворотний зв'язок вважаються критичними для ходьби. Ампутація порушує рухові та пропріоцептивні функції, що змушує людей з ампутацією більше покладатися на візуальний зворотний зв'язок для утримання рівноваги та здійснення кроків. У людей, які користуються протезами, також відбуваються зміни в параметрах функціонування гомілковостопного, колінного та стегнового суглобів здорової кінцівки, змінюються функціональні параметри збережених суглобів кінцівки із ампутацією.

Одним із поширених відхилень ходи при ампутації є асиметрія, яка є наслідком невідповідності біомеханічних параметрів між кінцівками під час циклу ходи [13]. Часто під час ходьби пацієнт витрачає більше часу в процесі кроку на неушкоджену кінцівку, ніж на протезну кінцівку [13, 44]. На ранніх етапах процесу реабілітації немає сформованої довіри та впевненості пацієнта у своєму протезі, є хибне враження, що навантажувати його так, як здорову кінцівку, не слід. Крім того, людині психологічно складно навантажити післяопераційну зону, адже ця ділянка чітко асоціюється з болем, раною, небезпекою. Проте, тимчасова асиметрія кроків також може бути пов'язана з іншими факторами, такими як особливості комплектуючих вузлів протеза, а також фізичних здібностей людини [8].

Асиметрія ходи може відмічатись не тільки у пацієнтів з ампутацією, але й при низці інших патологій, таких як хвороба Паркінсона, інсульт, церебральний параліч тощо [2, 26]. Неконтрольовані зміни в біомеханіці ходи у користувача протеза, зміна моделі ходи, в першу чергу її асиметрія, неправильна посадка протеза часто призводять до появи нефізіологічних сил, що діють на хребет і кінцівки та збільшують ризик виникнення вторинних патологічних станів опорно-рухового апарату, таких як хронічний біль у попереку, остеоартрит колінного та тазостегнового суглобів неушкодженої кінцівки, а також остеопенію та дегенеративні зміни залишкової кінцівки [22]. Такі пацієнти втрачають мотивацію до активного використання протеза, що різко негативно впливає на якість життя, знижує соціалізацію, погіршує професійну діяльність. В той же час, є багато повідомлень, що зменшення асиметрії та інших порушень ходи має вирішальне значення для досягнення ефективної мобільності та запобігання втомі, а також зниження ризику хронічного больового синдрому та дегенерації суглобів [3, 51].

Сучасним та перспективним способом корекції різних відхилень ходи та покращення тренування ходи є використання технології зворотного зв'язку. Доведено, що технологія зворотного зв'язку покращує навчання, надаючи користувачеві інформацію, яка ефективно впливає на рухове планування в мозку [7]. Пристрої зворотного зв'язку, які використовувалися в багатьох дослідженнях, були різними, включаючи візуальні, слухові, тактильні та комбіновані типи, більшість з них мали принаймні певний позитивний ефект на параметри ходи в учасників з ампутацією нижньої кінцівки. У контрольованих умовах візуальні сигнали можуть бути представлені у вигляді графіків або символів на екрані, коли людина ходить по обладнаній біговій доріжці або має датчики, прикріплені для вимірювання параметрів ходи. Слуховий зворотний зв'язок може сповістити людину через навушники про те, що вона, наприклад, ходить асиметрично [52]. Цю технологію непросто перенести в середовище за межами лабораторії, а необхідне обладнання, як-от бігові доріжки, силові пластини та комп'ютери, а також спеціально відведене лабораторне приміщення, як правило, є непомірно дорогими для використання в типових клінічних умовах. Проте в останні роки з'явилась ціла низка розробок, які дозволяють оцінити зміни в патерні ходи та забезпечити зворотний зв'язок з пацієнтом і є доволі доступними для пересічного користувача. Для прикладу, перспективна система Stride One, розроблена бельгійською компанією Ceriter виявляє відхилення моделі ходи за допомогою інтелектуальної устілки та генерує індивідуально на-

лаштований звуковий зворотний зв'язок з користувачем, стимулюючи пацієнта досягти правильного перекату та розподілу тиску стопи на опору. Система передбачає персоналізацію терапії для кожного окремого пацієнта лікуючим терапевтом [32].

Слухові стимули часто використовуються як пульсуючий ритмічний патерн (наприклад, метроном), який підсвідомо стимулює у пацієнта синхронізацію заданого ритму з ходом [33, 40] та дозволяє більш автоматично та підсвідомо контролювати ходу [33], покращує швидкість, тривалість та часову симетрію [15]. Це також може посилити зв'язок між сенсорним зворотним зв'язком і моторним виходом, що може сприяти формуванню моторних шаблонів, активацію нейронної мережі в спинному мозку, відповідальній за генерацію ритмічних рухів, таких як хода [49]. Є багато повідомлень про ефективність подібних систем, які можна використовувати протягом тривалих періодів терапії [11, 36, 38]. Дослідження, які використовували слуховий зворотний зв'язок у режимі реального часу, виявили позитивний вплив на симетрію ходи [23], висновок, який підтверджує систематичний огляд Highsmith et al., який заявив, що використання слухового зворотного зв'язку під час терапевтичного втручання є ефективним у покращенні ходи [26].

Вібротактильний зворотний зв'язок використовувався в багатьох дослідженнях різними способами. Час стійки було покращено завдяки такому зворотному зв'язку, який можна носити протягом усього циклу ходи [18]. Martini et al., також виявили, що використання переносного пристрою вібротактильного зворотного зв'язку покращує просторову симетрію [31]. Цей нейрофідбек був пов'язаний зі зниженням споживання енергії у дослідженні Wang et al. [50]. Вібрація, що застосовується локально до периферичних тканин, таких як м'язи або сухожилля, відрізняється від фармакологічних, психотерапевтичних та фізіотерапевтичних втручань [35]. Її ефект залежить від анатомічного розташування, фізичних властивостей і просторово-часових параметрів. З одного боку, фокальна вібраційна терапія впливає на центральну нервову систему через нейростимуляцію, яка називається нейромодуляцією [16], з іншого боку, це впливає на місцеві тканини, такі як кровоносні та лімфатичні судини. Вібротактильний зворотний зв'язок потенційно впливає на просторове відображення «телескопічного» або скороченого сприйняття фантомних кінцівок [41, 27]. Таким чином, він може бути хорошим неінвазивним методом відновлення відчуття для людей, які втратили периферичні аферентні сенсорні сигнали через хворобу або травматичне ушкодження [5]. Crea та ін. показали

у своїй роботі, що за допомогою вібротактильних блоків можна легко вивчити просторовий і часовий зв'язок між системою зворотного зв'язку та конкретними переходами фази ходи, але головною проблемою є система, яка забезпечує такий зворотний зв'язок, сприяючи фізіологічному шаблону ходи [14].

Прикладом вібротактильної сенсорної системи є Suralis, що складається з інерційного вимірювального блоку і сенсорної шкарпетки для вимірювання тиску. Для збору даних була розроблена модифікована версія системи зворотного зв'язку SAPHENUS Suralis (Suralis; SAPHENUS Medical Technology, Австрія). Система Suralis допомагає пацієнтам з ампутацією нижньої кінцівки в процесі реабілітації, приводячи в дію інтегровані в манжету вібраційні двигуни, що запускаються датчиками тиску, інтегрованими в носок, формуючи відчуття відсутньої стопи. Крім того, у контролері є можливість визначення тривимірного прискорення та кутової швидкості [9]. При використанні такої системи пацієнти збільшили дистанцію ходьби та відмітили стабільну ходьбу в різних умовах на різних поверхнях та кращий контроль постави та балансу під час ходьби по нерівній або м'якій поверхні. Більшість пацієнтів фіксувала підтверджене значне зниження фантомного болю протягом періоду навчання [17, 21].

Прикладом комбінованих систем, в яких діють декілька каналів зворотного зв'язку є платформа Тумо від австрійської компанії Tugomotion, яка дозволяє проводити оцінку балансу та інших параметрів, важливих для оцінки ходи та корекції балансу. Такі роботизовані комплекси довели свою ефективність при хворобі Паркінсона, нестабільності хребта, ДЦП та інших захворюваннях [10, 20, 29, 30, 37], проте якісних завершених досліджень у пацієнтів, котрі користуються протезом, на даний момент немає.

Застосування віртуальної реальності (virtual reality – VR) для терапії координації, балансу та навиків користування протезом у змінних та складних умовах є перспективним, інноваційним та ціка-

вим як для терапевта, так і для пацієнта. Є значна кількість повідомлень про суттєвий позитивний вплив на параметри балансу, оцінку рівноваги за шкалою Берга, тесту «Встань і йди» динамічний індекс ходи [1, 25] а також фантомного болю [10, 20, 29, 48]. Високотехнологічні підходи, такі як віртуальна реальність, орієнтовані на терапію відеоігри із системами біологічного зворотного зв'язку, є багатообіцяючими для підвищення ефективності реабілітації в клінічному закладі та вдома [34, 45, 47]. Ці технології стають дедалі доступнішими, використовують переваги моторного навчання та стратегії повторного навчання, щоб прискорити процес реабілітації. Основною перевагою систем VR-систем є здатність забезпечувати безперервний зворотний зв'язок у режимі реального часу для зміцнення цілей фізіотерапевта/протезиста і тренування навичок ходи [24, 28, 39, 42] за допомогою відповідної модальності зворотного зв'язку із активацією візуального [12, 19], слухового [52], тактильного аналізаторів або мультимодального зворотного зв'язку [4, 46].

Висновки. Використання технологій зворотного зв'язку, які побудовані на активації та тренуванні зорового, слухового, пропріорецепторного аналізаторів, є сучасними та ефективними методами реабілітації порушень балансу та ходи у пацієнтів після ампутації нижньої кінцівки. Особливо перспективними є розробки, котрі застосовують вібротактильний зворотний зв'язок та комбіновані системи, котрі задіюють декілька каналів сенсорної інформації – роботизовані комплекси та віртуальна реальність. Доведено, що застосування реабілітаційних методик із системою зворотного біологічного зв'язку мають позитивний ефект на параметри балансу, рівноваги, забезпечують впевненість користувача протеза при ходьбі в складних умовах, зменшують страх та ризик падіння, покращують якість життя.

Перспективи подальших досліджень. Дослідження та впровадження технологій зворотного зв'язку в клінічну практику у пацієнтів після ампутації нижніх кінцівок.

ЛІТЕРАТУРА

1. The effect of adding virtual reality training on traditional exercise program on balance and gait in unilateral, traumatic lower limb amputee / R. L. Abbas, D. Cooreman, H. Al Sultan [et al.] // Games for health journal. – 2021. – Vol. 10, No 1. – P. 50–56.
2. Adamczyk P. G. Mechanisms of Gait Asymmetry Due to Push-off Deficiency in Unilateral Amputees / P. G. Adamczyk, A. D. Kuo // IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. – 2015. – Vol. 23. – P. 776–785.
3. Effects of Vibrotactile Biofeedback Coding Schemes on Gait Symmetry Training of Individuals with Stroke /

M. R. Afzal, H. Lee, A. Eizad [et al.] // IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. – 2019. – Vol. 27. – P. 1617–1625.

4. A novel balance training system using multimodal biofeedback / M. R. Afzal, M.-K. Oh, H. Y. Choi, J. Yoon // Biomed. Eng. Online. – 2016. – Vol. 15. – P. 42.

5. Vibrotactile feedback systems: Current trends in rehabilitation, sports and information display / A. U. Alahakone, S. M. N. A. Senanayake // Proceedings of the 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Singapore, 14–17 July 2009. – P. 1148–1153.

6. Virtual reality treatment displaying the missing leg improves phantom limb pain: a small clinical trial / E. Ambron, L. J. Buxbaum, A. Miller [et al.] // *Neurorehabilitation and neural repair*. – 2021. – Vol. 35, No 12. – P. 1100–1111.
7. Neurophysiological Correlates of Gait Retraining with Real-Time Visual and Auditory Feedback / W. W. An, K.-H. Ting, I. P. Au [et al.] // *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* – 2019. – Vol. 27. – P. 1341–1349.
8. Gait Performance of Friction-Based Prosthetic Knee Joint Swing-Phase Controllers in Under-Resourced Settings / J. Andrysek, A. Michelini, A. Eshraghi [et al.] // *Prosthesis*. – 2022. – Vol. 4, No 1. – P. 125–135. – DOI: 10.3390/prosthesis4010013.
9. Ground Contact Time Estimating Wearable Sensor to Measure Spatio-Temporal Aspects of Gait / S. Bernhart, S. Kranzinger, A. Berger, G. Peternell // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, No 9. – P. 3132.
10. Rehabilitation of older people with Parkinson's disease: An innovative protocol for RCT study to evaluate the potential of robotic-based technologies / R. Bevilacqua, E. Maranesi, M. Di Rosa [et al.] // *BMC neurology*. – 2020. – Vol. 20. – P. 1-8.
11. Wearable Devices for Biofeedback Rehabilitation: A Systematic Review and Meta-Analysis to Design Application Rules and Estimate the Effectiveness on Balance and Gait Outcomes in Neurological Diseases / T. Bowman, E. Gervasoni, C. Arienti [et al.] // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – P. 3444.
12. Effects of extended powered knee prosthesis stance time via visual feedback on gait symmetry of individuals with unilateral amputation: A preliminary study / A. Brandt, W. Riddick, J. W. Stallrich [et al.] // *J. Neuroeng. Rehabil.* – 2019. – Vol. 16. – P. 112.
13. Cabral S. Gait Symmetry Measures and their Relevance to Gait Retraining / S. Cabral // *Handbook of Human Motion*. – Cham: Springer International Publishing, 2017. – P. 1–19. DOI: 10.1007/978-3-319-30808-1_201-1.
14. Providing time-discrete gait information by wearable feedback apparatus for lower-limb amputees: Usability and functional validation / S. Crea, C. Cipriani, M. Donati [et al.] // *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* – 2015. – Vol. 23. – P. 250–257.
15. The Effect of Rhythm Abilities on Metronome-Cued Walking with an Induced Temporal Gait Asymmetry in Neurotypical Adults / L. D. Crosby, J. L. Chen, J. A. Grahn, K. K. Paterson // *J. Mot. Behav.* – 2022. – Vol. 54. – P. 267–280.
16. Danilov Y. P. Translingual Neurostimulation (TLNS): A novel approach to neurorehabilitation / Y. P. Danilov // *J. Neurol. Neurophysiol.* – 2017. – Vol. 8.
17. Leg prosthesis with somatosensory feedback reduces phantom limb pain and increases functionality / C. Dietrich, S. Nehrlich, S. Seifert [et al.] // *Front Neurol.* – 2018. – Vol. 9. – P. 270.
18. Escamilla-Nunez R. Wearable Vibrotactile Biofeedback System Targeting Gait Symmetry of Lower-limb Prosthetic Users / R. Escamilla-Nunez, A. Michelini, J. A. Andrysek // *Proceedings of the 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), Montreal, QC, Canada, 20–24 July 2020*. – P. 3281–3284.
19. Can real-time visual feedback during gait retraining reduce metabolic demand for individuals with transtibial amputation? / E. R. Esposito, H. S. Choi, B. J. Darter, J. Wilken // *PLoS ONE*. – 2017. – Vol. 12. – e0171786.
20. Farion-Navolska O. V. Rehabilitation of patients with cervical and lumbar spine instability using tymo robotic stabilometrical platform / O. V. Farion-Navolska // *Актуальні проблеми сучасної медицини: Вісник Української медичної стоматологічної академії*. – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 58-62.
21. Flor H. The modification of cortical reorganization and chronic pain by sensory feedback / H. Flor // *Applied psychophysiology and biofeedback*. – 2002. – Vol. 27. – P. 215–227.
22. Gailey R. Review of secondary physical conditions associated with lower-limb amputation and long-term prosthesis use / R. Gailey // *J. Rehabil. Res. Dev.* – 2008. – Vol. 45. – P. 15–30.
23. The Effectiveness of the DoD/VA Mobile Device Outcomes-Based Rehabilitation Program for High Functioning Service Members and Veterans with Lower Limb Amputation / Gaunaud I., Gailey R., Springer B. [et al.] // *Mil. Med.* – 2020. – Vol. 185. – P. 480–489.
24. Giggins O. M. Biofeedback in rehabilitation / O. M. Giggins, U. M. Persson, B. Caulfield // *J. Neuroeng. Rehabil.* – 2013. – Vol. 10. – P. 60.
25. Virtual Reality-Based Rehabilitation to Restore Motor Function in People With Amputation: A Systematic Literature Review / J. Hao, Z. Chen, A. Remis, Z. He // *American journal of physical medicine & rehabilitation*. – 2023. – Vol. 102, No 5. – P. 468–474.
26. Gait Training Interventions for Lower Extremity Amputees: A Systematic Literature Review / M. J. Highsmith, C. R. Andrews, C. Millman [et al.] // *Technol. Innov.* – 2016. – Vol. 18. – P. 99–113.
27. Hill A. Phantom limb pain: A review of the literature on attributes and potential mechanisms / A. Hill // *J. Pain Symptom Manag.* – 1999. – Vol. 17. – P. 125–142.
28. Balance Improvement Effects of Biofeedback Systems with State-of-the-Art Wearable Sensors: A Systematic Review / C. Z.-H. Ma, D. W.-C. Wong, W.-K. Lam [et al.] // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16. – P. 434.
29. The effect of non-immersive virtual reality exergames versus traditional physiotherapy in Parkinson's disease older patients: preliminary results from a randomized-controlled trial / E. Maranesi, E. Casoni, R. Baldoni [et al.] // *International journal of environmental research and public health*. – 2022. – Vol. 19, No 22. – P. 14818.
30. Acceptability and Preliminary Results of Technology-Assisted Balance Training in Parkinson's Disease / E. Maranesi, V. Di Donna, G. Pelliccioni [et al.] // *International journal of environmental research and public health*. – 2022. – Vol. 19, No 5. – P. 2655.
31. Increased Symmetry of Lower-Limb Amputees Walking with Concurrent Bilateral Vibrotactile Feedback / E. Martini, I. Cesini, J. D'Abbraccio [et al.] // *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* – 2021. – Vol. 29. – P. 74–84.
32. CERITER Clinical study-Stride One / S. Meyer, J. Liemet, P. Stevens, M. Michielsen // *medRxiv*. – 2024. – Vol. 09.
33. Michelini A. The Short-Term Effects of Rhythmic Vibrotactile and Auditory Biofeedback on the Gait of Individuals After Weight-Induced Asymmetry / A. Michelini, H. Sivasambu, J. Andrysek // *Can. Prosthet. Orthot. J.* – 2022. – Vol. 5.

34. Using the Nintendo Wii Fit and Body Weight Support to Improve Aerobic Capacity, Balance, Gait Ability, and Fear of Falling / Miller C.A., Hayes D.M., Dye K. [et al.] // J. Geriatr. Phys. Ther. – 2012. – Vol. 35. – P. 95–104.
35. Vibration therapy role in neurological diseases rehabilitation: An umbrella review of systematic reviews / L. Moggio, A. De Sire, N. Marotta [et al.] / Disabil. Rehabil. – 2021. – P. 1–9.
36. Utilization of Wearable Technology to Assess Gait and Mobility Post-Stroke: A Systematic Review / D. M. Peters, E. S. O'Brien, K. E. Kamrud [et al.] / J. Neuroeng. Rehabil. – 2021. – Vol. 18. – P. 67.
37. Pin T. W. The effect of interactive computer play on balance and functional abilities in children with moderate cerebral palsy: a pilot randomized study / T. W. Pin, P. B. Butler // Clinical rehabilitation. – 2019. – Vol. 33, No 4. – P. 704-710.
38. Design and Technical Validation of a Wearable Biofeedback System for Robotic Gait Rehabilitation / C. Pinheiro, J. M. Lopes, J. Figueiredo [et al.] / Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, ICARSC 2020, Ponta Delgada, Portugal, 15–17 April 2020. – P. 16–21.
39. Plaque A. A Haptic Feedback System for Phase-Based Sensory Restoration in Above-Knee Prosthetic Leg Users / A. Plaque, D. Villarreal, R. Gregg // IEEE Trans. Haptics. – 2016. – Vol. 9. – P. 421–426.
40. Gait Coordination after Stroke: Benefits of Acoustically Paced Treadmill Walking / M. Roerdink, C. J. C. Lamoth, G. Kwakkel [et al.] // Phys. Ther. – 2007. – Vol. 87. – P. 1009–1022.
41. Multisensory bionic limb to achieve prosthesis embodiment and reduce distorted phantom limb perceptions / G. Rognini, F.M. Petrini, S. Raspopovic [et al.] // J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry. – 2019. – Vol. 90. – P. 833–836.
42. Can vibratory feedback be used to improve postural stability in persons with transtibial limb loss? / D. F. Rusaw, K. Hagberg, L. Nolan, N. Ramstrand // J. Rehabil. Res. Dev. – 2012. – Vol. 49. – P. 1239.
43. A virtual reality intervention for the treatment of phantom limb pain: development and feasibility results / T. Rutledge, D. Velez, C. Depp [et al.] // Pain Medicine. – 2019. – Vol. 20, No 10. – P. 2051–2059.
44. Biomechanics and physiological parameters during gait in lower-limb amputees: A systematic review / Y. Saga-wa, K. Turcot, S. Armand [et al.] // Gait Posture. – 2011. – Vol. 33, No 4. – P. 511–526. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2011.02.003.
45. Shull P. B. Haptic wearables as sensory replacement, sensory augmentation and trainer – a review / P. B. Shull, D. D. Damian // J. Neuroeng. Rehabil. – 2015. – Vol. 12. – P. 59.
46. Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review / R. Sigrist, G. Rauter, R. Riener, P. Wolf // Psychon. Bull. Rev. – 2012. – Vol. 20. – P. 21–53.
47. Staiano A. E. Therapeutic Uses of Active Video-games: A Systematic Review / A. E. Staiano, R. Flynn // Games Health J. – 2014. – Vol. 3. – P. 351–365.
48. Immersive virtual reality applied to the rehabilitation of patients with lower limb amputation: a small randomized controlled trial for feasibility study / B. M. Steckel, R. Schwertner, J. Bucker [et al.] // Virtual Reality. – 2024. – Vol. 28, No 2. – P. 1–15.
49. Exercise, Music, and the Brain: Is There a Central Pattern Generator? / S. Stefan, C. D. Askew, T. Abel, H. K. Strüder // J. Sports Sci. – 2010. – Vol. 28. – P. 1337–1343.
50. A systematic literature review of physiotherapy and rehabilitation approaches to lower-limb amputation / Ö. Ülger, T. Y. Sahan, S. E. Çelik // Physiother. Theory Pract. – 2018. – Vol. 34. – P. 821–834.
51. Walking Asymmetry and Its Relation to Patient-Reported and Performance-Based Outcome Measures in Individuals with Unilateral Lower Limb Loss / C. K. Wong, E. E. Vandervort, K. M. Moran [et al.] // Int. Biomech. – 2022. – Vol. 9. – P. 33–41.
52. Utilization of a lower extremity ambulatory feedback system to reduce gait asymmetry in transtibial amputation gait / L. Yang, P. Dyer, R. Carson [et al.] // Gait Posture. – 2012. – Vol. 36. – P. 631–634.

REFERENCES

1. Abbas, R.L., Cooreman, D., Al Sultan, H., El Naya, M., Saab, I. M., & El Khatib, A. (2021). The effect of adding virtual reality training on traditional exercise program on balance and gait in unilateral, traumatic lower limb amputee. *Games for health journal*, 10(1), 50-56.
2. Adamczyk, P.G., Kuo, A.D. (2015). Mechanisms of Gait Asymmetry Due to Push-off Deficiency in Unilateral Amputees. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 23, 776-785.
3. Afzal, M.R., Lee, H., Eizad, A., Lee, C.H., Oh, M.K., Yoon, J. (2019). Effects of Vibrotactile Biofeedback Coding Schemes on Gait Symmetry Training of Individuals with Stroke. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 27, 1617-1625.
4. Afzal, M.R., Oh, M.-K., Choi, H.Y., Yoon, J. (2016). A novel balance training system using multimodal biofeedback. *Biomed. Eng. Online*, 15, 42.
5. Alahakone, A.U., Senanayake, S.M.N.A. Vibrotactile feedback systems: Current trends in rehabilitation, sports and information display. In *Proceedings of the 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Singapore, 14–17 July 2009, pp. 1148-1153.
6. Ambron, E., Buxbaum, L.J., Miller, A., Stoll, H., Kuchenbecker, K.J., & Coslett, H.B. (2021). Virtual reality treatment displaying the missing leg improves phantom limb pain: a small clinical trial. *Neurorehabilitation and neural repair*, 35(12), 1100-1111.
7. An, W.W., Ting, K.-H., Au, I.P., Zhang, J.H., Chan, Z.Y.S., Davis, I.S., So, W.K.Y., Chan, R.H.M., Cheung, R.T.H. (2019). Neurophysiological Correlates of Gait Retraining with Real-Time Visual and Auditory Feedback. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 27, 1341-1349.
8. Andrysek, J., Michelini, A., Eshraghi, A., Kheng, S., Heang, T., and Thor, P. (2022). Gait Performance of Friction-Based Prosthetic Knee Joint Swing-Phase Controllers in Under-Resourced Settings. *Prosthesis*, 4(1), 125-135, DOI: 10.3390/prosthesis4010013.

9. Bernhart, S., Kranzinger, S., Berger, A., Peternell, G. (2022). Ground Contact Time Estimating Wearable Sensor to Measure Spatio-Temporal Aspects of Gait. *Sensors*, 22(9), 3132.
10. Bevilacqua, R., Maranesi, E., Di Rosa, M., Luzi, R., Casoni, E., Rinaldi, N., ... & Riccardi, G. R. (2020). Rehabilitation of older people with Parkinson's disease: An innovative protocol for RCT study to evaluate the potential of robotic-based technologies. *BMC neurology*, 20, 1-8.
11. Bowman, T., Gervasoni, E., Arienti, C., Lazzerini, S.G., Negrini, S., Crea, S., Cattaneo, D., Carrozza, M.C. (2021). Wearable Devices for Biofeedback Rehabilitation: A Systematic Review and Meta-Analysis to Design Application Rules and Estimate the Effectiveness on Balance and Gait Outcomes in Neurological Diseases. *Sensors*, 21, 3444.
12. Brandt, A., Riddick, W., Stallrich, J.W., Lewek, M., Huang, H. (Helen) (2019). Effects of extended powered knee prosthesis stance time via visual feedback on gait symmetry of individuals with unilateral amputation: A preliminary study. *J. Neuroeng. Rehabil.*, 16, 112.
13. Cabral, S. (2017). *Gait Symmetry Measures and their Relevance to Gait Retraining. Handbook of Human Motion*, Cham: Springer International Publishing. pp. 1-19. DOI: 10.1007/978-3-319-30808-1_201-1.
14. Crea, S., Cipriani, C., Donati, M., Carrozza, M.C., Vitiello, N. (2015). Providing time-discrete gait information by wearable feedback apparatus for lower-limb amputees: Usability and functional validation. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 23, 250-257.
15. Crosby, L.D., Chen, J.L., Grahn, J.A., Patterson, K.K. (2022). The Effect of Rhythm Abilities on Metronome-Cued Walking with an Induced Temporal Gait Asymmetry in Neurotypical Adults. *J. Mot. Behav.*, 54, 267-280.
16. Danilov, Y.P. (2017). Translingual Neurostimulation (TLNS): A novel approach to neurorehabilitation. *J. Neurol. Neurophysiol.*, 08.
17. Dietrich, C., Nehrdich, S., Seifert, S., Blume, K.R., Miltner, W.H.R., Hofmann, G.O., & Weiss, T. (2018). Leg prosthesis with somatosensory feedback reduces phantom limb pain and increases functionality. *Front Neurol.*, 9, 270.
18. Escamilla-Nunez, R., Michelini, A., Andrysek, J. A Wearable Vibrotactile Biofeedback System Targeting Gait Symmetry of Lower-limb Prosthetic Users. In Proceedings of the 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), Montreal, QC, Canada, 20-24 July 2020, pp. 3281-3284.
19. Esposito, E.R., Choi, H.S., Darter, B.J., Wilken, J. (2017). Can real-time visual feedback during gait retraining reduce metabolic demand for individuals with transtibial amputation? *PLoS ONE*, 12, e0171786.
20. Farion-Navolska, O.V. (2023). Rehabilitation of patients with cervical and lumbar spine instability using tymbotic stabilometrical platform. *Aktual'ni problemy suchasnoyi medytyny: Visnyk Ukrayins'koyi medychnoyi stomatolohichnoyi akademiyi – Actual problems of modern medicine: Bulletin of the Ukrainian Medical Stomatological Academy*, 23(3), 58-62 [in Ukrainian].
21. Flor, H. (2002). The modification of cortical reorganization and chronic pain by sensory feedback. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 27, 215-227.
22. Gailey, R. (2008). Review of secondary physical conditions associated with lower-limb amputation and long-term prosthesis use. *J. Rehabil. Res. Dev.*, 45, 15-30.
23. Gaunard, I., Gailey, R., Springer, B., Symsack, A., Clemens, S., Lucarevic, J., Kristal, A., Bennett, C., Isaacson, B., Agrawal, V., et al. (2020). The Effectiveness of the DoD/VA Mobile Device Outcomes-Based Rehabilitation Program for High Functioning Service Members and Veterans with Lower Limb Amputation. *Mil. Med.*, 185, 480-489.
24. Giggins, O.M., Persson, U.M., Caulfield, B. (2013). Biofeedback in rehabilitation. *J. Neuroeng. Rehabil.*, 10, 60.
25. Hao, J., Chen, Z., Remis, A., & He, Z. (2023). Virtual Reality-Based Rehabilitation to Restore Motor Function in People With Amputation: A Systematic Literature Review. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 102(5), 468-474.
26. 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. *Technol. Innov.*, 18, 99-113.
27. Hill, A. (1999). Phantom limb pain: A review of the literature on attributes and potential mechanisms. *J. Pain Symptom Manag.*, 17, 125-142.
28. Ma, C.Z.-H., Wong, D.W.-C., Lam, W.-K., Wan, A.H.-P., Lee, C.C.W. (2016). Balance Improvement Effects of Biofeedback Systems with State-of-the-Art Wearable Sensors: A Systematic Review. *Sensors*, 16, 434.
29. Maranesi, E., Casoni, E., Baldoni, R., Barboni, I., Rinaldi, N., Tramontana, B., ... & Bevilacqua, R. (2022). The effect of non-immersive virtual reality exergames versus traditional physiotherapy in Parkinson's disease older patients: preliminary results from a randomized-controlled trial. *International journal of environmental research and public health*, 19(22), 14818.
30. Maranesi, E., Di Donna, V., Pelliccioni, G., Cameriere, V., Casoni, E., Baldoni, R., ... & Bevilacqua, R. (2022). Acceptability and Preliminary Results of Technology-Assisted Balance Training in Parkinson's Disease. *International journal of environmental research and public health*, 19(5), 2655.
31. Martini, E., Cesini, I., D'Abbraccio, J., Arnetoli, G., Doronzio, S., Giffone, A., Meoni, B., Oddo, C.M., Vitiello, N., Crea, S. (2021). Increased Symmetry of Lower-Limb Amputees Walking with Concurrent Bilateral Vibrotactile Feedback. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 29, 74-84.
32. Meyer, S., Limet, J., Stevens, P., & Michielsen, M. (2024). CERITER Clinical Study-Stride One. *MedRxiv*, 09.
33. Michelini, A., Sivasambu, H., Andrysek, J. (2022). The Short-Term Effects of Rhythmic Vibrotactile and Auditory Biofeedback on the Gait of Individuals After Weight-Induced Asymmetry. *Can. Prosthet. Orthot. J.*, 5.
34. Miller, C.A., Hayes, D.M., Dye, K., Johnson, C., Meyers, J. (2012). Using the Nintendo Wii Fit and Body Weight Support to Improve Aerobic Capacity, Balance, Gait Ability, and Fear of Falling. *J. Geriatr. Phys. Ther.*, 35, 95-104.
35. Moggio, L., De Sire, A., Marotta, N., Demeco, A., Ammendolia, A. (2021). Vibration therapy role in neurological diseases rehabilitation: An umbrella review of systematic reviews. *Disabil. Rehabil.*, 1-9.
36. Peters, D.M., O'Brien, E.S., Kamrud, K.E., Roberts, S.M., Rooney, T.A., Thibodeau, K.P., Balakrishnan, S., Gell, N., Mohapatra, S. (2021). Utilization of Wearable Technology to Assess Gait and Mobility Post-Stroke: A Systematic Review. *J. Neuroeng. Rehabil.*, 18, 67.

37. Pin, T.W., & Butler, P.B. (2019). The effect of interactive computer play on balance and functional abilities in children with moderate cerebral palsy: a pilot randomized study. *Clinical rehabilitation*, 33(4), 704-710.
38. Pinheiro, C., Lopes, J.M., Figueiredo, J., Goncalves, L.M., Santos, C.P. Design and Technical Validation of a Wearable Biofeedback System for Robotic Gait Rehabilitation. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, ICARSC 2020, Ponta Delgada, Portugal, 15–17 April 2020, pp. 16-21.
39. Plache, A., Villarreal, D., Gregg, R. (2016). A Haptic Feedback System for Phase-Based Sensory Restoration in Above-Knee Prosthetic Leg Users. *IEEE Trans. Haptics*, 9, 421-426.
40. Roerdink, M., Lamoth, C.J.C., Kwakkel, G., Van Wieringen, P.C.W., Beek, P.J. (2007). Gait Coordination after Stroke: Benefits of Acoustically Paced Treadmill Walking. *Phys. Ther.*, 87, 1009-1022.
41. Rognini, G., Petrini, F.M., Raspopovic, S., Valle, G., Granata, G., Strauss, I., Solcà, M., Bello-Ruiz, J., Herbelin, B., Mange, R., et al. (2019). Multisensory bionic limb to achieve prosthesis embodiment and reduce distorted phantom limb perceptions. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, 90, 833-836.
42. Rusaw, D.F., Hagberg, K., Nolan, L., Ramstrand, N. (2012). Can vibratory feedback be used to improve postural stability in persons with transtibial limb loss? *J. Rehabil. Res. Dev.*, 49, 1239.
43. Rutledge, T., Velez, D., Depp, C., McQuaid, J. R., Wong, G., Jones III, R. C. W., ... & Giap, H. (2019). A virtual reality intervention for the treatment of phantom limb pain: development and feasibility results. *Pain Medicine*, 20(10), 2051-2059.
44. Sagawa Y., Turcot K., Armand S., Thevenon A., Vuillerme N., and Watelain E., (2011). Biomechanics and physiological parameters during gait in lower-limb amputees: A systematic review. *Gait Posture*, 33(4), 511-526, DOI: 10.1016/j.gaitpost.2011.02.003.
45. Shull, P.B., Damian, D.D. (2015). Haptic wearables as sensory replacement, sensory augmentation and trainer – a review. *J. Neuroeng. Rehabil.*, 12, 59.
46. Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., Wolf, P. (2012). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. *Psychon. Bull. Rev.*, 20, 21-53.
47. Staiano, A.E., Flynn, R. (2014). Therapeutic Uses of Active Videogames: A Systematic Review. *Games Heal. J.*, 3, 351-365.
48. Steckel, B. M., Schwertner, R., Bückner, J., Naza-reth, A. C. D. P., Bizarro, L., & Oliveira, A. A. D. (2024). Immersive virtual reality applied to the rehabilitation of patients with lower limb amputation: a small randomized controlled trial for feasibility study. *Virtual Reality*, 28(2), 1-15.
49. Stefan, S., Askew, C.D., Abel, T., Strüder, H.K. (2010). Exercise, Music, and the Brain: Is There a Central Pattern Generator? *J. Sports Sci.*, 28, 1337-1343.
50. Ülger, Ö., Sahan, T.Y., Çelik, S.E. (2018). A systematic literature review of physiotherapy and rehabilitation approaches to lower-limb amputation. *Physiother. Theory Pract.*, 34, 821-834.
51. Wong, C.K., Vandervort, E.E., Moran, K.M., Adler, C.M., Chihuri, S.T., Youdan, G.A. (2022). Walking Asymmetry and Its Relation to Patient-Reported and Performance-Based Outcome Measures in Individuals with Unilateral Lower Limb Loss. *Int. Biomech.*, 9, 33-41
52. Yang, L., Dyer, P., Carson, R., Webster, J., Foreman, K.B., Bamberg, S. (2012). Utilization of a lower extremity ambulatory feedback system to reduce gait asymmetry in transtibial amputation gait. *Gait Posture*, 36, 631-634.

BIOFEEDBACK SYSTEMS IN PATIENTS WITH AMPUTATION: A LITERATURE REVIEW

©Yu. V. Zavidniuk, O. O. Shevchuk, I. R. Mysula, T. H. Bakaliuk, V. Yu. Zavidniuk

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

SUMMARY. Prosthesis users experience significant changes in biomechanical gait parameters depending on the level of amputation and, to a large extent, on the prosthesis components. Due to the active spread of computer technologies and methods of data collection and processing, biofeedback systems for improving gait retraining in prosthesis users have become much more accessible.

The aim – to review the current research on the use of biofeedback systems in patients after amputation and to identify promising methods for inclusion in routine physical therapy and rehabilitation strategies in general.

Visual and somatosensory feedback are considered critical for walking. Amputation disrupts motor and proprioceptive functions, forcing amputees to rely more on visual feedback to maintain balance and take steps. The feedback devices used in many studies have varied, including visual, auditory, haptic, and combined types, most of which have had at least some positive effect on gait parameters in participants with lower limb amputation.

Conclusions: The use of feedback technologies based on the activation and training of visual, auditory, and proprioceptive analyzers are modern and effective methods of rehabilitation of balance and gait disorders in patients after lower limb amputation. Particularly promising are developments that use vibrotactile feedback and combined systems that use several channels of sensory information, such as robotic systems and virtual reality. It has been proven that the use of rehabilitation techniques with a biofeedback system has a positive effect on balance and equilibrium parameters, provides confidence to the prosthesis user when walking in difficult conditions, reduces fear and risk of falling, and improves quality of life.

KEY WORDS: amputation; rehabilitation; biofeedback; prosthetics.

Отримано 06.11.2024

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