

Ігор ПРОКОПОВИЧ^{1,4}, д-р техн. наук, проф.,
Костянтин ДЯДЮРА¹, д-р техн. наук, проф.,
Ірина БАБОВА², д-р мед. наук, проф.,
Татьяна БЕЗВЕРХНЮК³,
Руслан ЗАЛОГА⁴, аспірант

¹ Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна, e-mail: dyadyura.k.o@op.edu.ua, rashaprokorovich@gmail.com

² ДУ «Український науково-дослідний інститут медичної реабілітації та курортології МОЗ України», м. Одеса, Україна, e-mail: tatiana.bezverkhniuk@gmail.com

³ ДЗ «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського», м. Одеса, Україна, e-mail: babovairina@gmail.com

⁴ Сумський державний університет, м. Суми, Україна, e-mail: r.zaloha@tmvi.sumdu.edu.ua

КОМПЛЕКСНА РЕАБІЛІТАЦІЯ ВОЄННИХ ТРАВМ ОПОРНО-РУХОВОГО АПАРАТУ РІЗНИХ ГРУП НАСЕЛЕННЯ НА ОСНОВІ ІНДИВІДУАЛЬНИХ 3D ОРТОПЕДИЧНИХ ОРТЕЗІВ СТОПИ З МЕХАНІЧНОЮ ПІДОШОВНОЮ СТИМУЛЯЦІЄЮ

Анотація. Категорії громадян перебуваючи безпосередньо в районах та у період проведення воєнних (бойових) дій, які отримали поранення, контузію, каліцтво або захворювання опорно-рухового апарату та втратили функціональні можливості нижньої кінцівки або кінцівок потребують для реабілітації ортезування виробами підвищеної функціональності за новітніми технологіями, що відповідають потребам пацієнтів з різними можливостями. Нові методи лікування, засновані на периферичній стимуляції сенсорно-моторної системи, виявилися перспективними в стратегіях реабілітації пацієнтів з неврологічними розладами, включаючи поранення, контузію, особливо щодо зменшення порушення ходи, а отже, частоти падінь. Останні наукові дані підтверджують ідею, що підошвна стимуляція стопи збільшує функціональний зв'язок областей мозку, залучених до зорово-просторової та сенсорно-моторної інтеграції. Враховуючи сенсорний дефіцит у пацієнтів з неврологічними порушеннями, у роботі запропонована автоматизована механічна периферична стимуляція, що застосовується під стопою, як нове реабілітаційне лікування.

Ключові слова: Індивідуальні ортези стопи, сегментація, адитивне виробництво, оптимізовані дані медичних зображень.

Актуальність дослідження. Просторово-часові параметри ходи розглядають як клінічну характеристику, яка корелює з продромальною фазою нейрокогнітивних захворювань. Попередні дослідження [1, 2] показали, що врахування різних параметрів (постави та ходи) дозволяє дослідникам кількісно оцінити покращення зі статичної та динамічної точок зору. Насправді, параметри постави надають інформацію про статичне коливання, тоді як параметри ходи надають інформацію про якість ходьби. В нейровізуалізаційних дослідженнях підтверджено, що когнітивні функції та контроль ходи мають спільні нейронні мережі та генетичні детермінанти, особливо в префронтальній, тім'яній та скроневої областях [3, 4] головного мозку. В останні роки були запропоновані нові стратегії реабілітації, щоб забезпечити альтернативні підходи до порушень ходи та постави [5, 6, 7]. В чисельних дослідженнях з використанням різних методів доведено вплив периферичної стимуляції «знизу вгору» та роль сенсорних рецепторів, таких як пропріорецептори, у забезпеченні постійного зворотного зв'язку з центральною нервовою системою [8, 10]. Стимуляція на основі низьких рівнів тиску ($0,3...0,9 \text{ Н/мм}^2$) на певних ділянках підошви впливає на механорецептори стоп для створення сенсорного зворотного зв'язку, важливого для сприйняття змін орієнтації тіла; цей зворотний зв'язок може покращити постуральне коливання та просторово-часові параметри ходи. Досліджено [2, 4, 5, 6, 7], що механічна підошвна стимуляція збільшує зв'язок мозку в стані спокою між правими первинними сенсомоторними областями та лівою префронтальною корою; ці

області пов'язані з сенсомоторною інформацією, яка може бути основою для покращення ходи та рівноваги. Проведений аналіз результатів вибору, проектування, виготовлення та використання індивідуальних ортопедичних засобів для стопи виготовлених на основі адитивних 3D технологій показує, що потрібні якісні випробування для підвищення ефективності застосування ортезів при реабілітації пацієнтів з неврологічними та ортопедичними розладами, включаючи поранення, контузію, особливо щодо зменшення порушення ходи. Потребуює дослідження вплив механічної стимуляції на нейробиомеханічні змінні, за допомогою яких здійснюється практика діагностування, профілактики, лікування та реабілітації ортопедичних порушень стопи, захворювань опорно-рухового апарату. Тема дослідження та його зміст відповідають одному з пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки (у відповідності до статті 3 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки») – нові технології профілактики та лікування найпоширеніших захворювань, а також тематичному напрямку конкурсу проектів Національного фонду досліджень України «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» – комплексна реабілітації різних груп населення, пов'язана з воєнними травмами. Завдання дослідження узгоджується з напрямами реалізації проекту «Реабілітація травм війни в Україні» (Міністерство охорони здоров'я України, опубліковано 02 серпня 2022 року). Дослідження спрямовані на вирішення завдань, що регламентуються постановою Кабінету Міністрів України від 12 квітня 2022 року № 454 «Про внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України щодо забезпечення допоміжними засобами реабілітації (технічними та іншими засобами реабілітації) осіб постраждалих внаслідок агресії російської федерації проти України».

Метою дослідження є встановлення ефекту механічної підошовної стимуляції стопи за допомогою налаштованих індивідуальних 3D ортезів для стоп, перевірити зміни просторово-часових параметрів ходи та постави у різних груп населення із зниженням когнітивних функцій після різних воєнних травм, розробити 3D-технологій виготовлення індивідуальних ортопедичних ортезів стопи з механічною підошовною стимуляцією.

Основні матеріали досліджень. Проведені діагностичні дослідження для різних груп населення, які отримали воєнні травми опорно-рухового апарату та частково втратили функціональні можливості нижньої кінцівки або кінцівок та потребують для реабілітації ортезування виробами підвищеної функціональності. Для оцінки рівноваги та когнітивних сфер використано наступні валідовані шкали та тести: індекс Бартела, шкала Тінетті, госпітальна шкала тривоги та депресії (HADS), тест «встань та йди» Timed Up and Go test (TAG), короткі опитувальники якості життя SF-12 та EuroQoL-5D, 10 метровий тест ходи (оцінка швидкості ходьби) та 6 хвилинний тест ходи. Після оцінки ортопедичного стану стопи кожного пацієнта виконано 3D сканування за допомогою лазерного сканера 3D сканер iQube E500 3D FootScanner (3D Systems, Rock Hill, SC, USA), а результати опрацьовані в програмі 3D CAD (Rhinoceros; McNeel, Сіетл, Вашингтон, США), що буде використано для створення та генерації 3D-моделі індивідуальної устілки для кожного пацієнта. Конструкція та форма індивідуальних ортезів стопи (CFO) з механічною стимуляцією були засновані на нещодавніх даних з наукової літератури: розподіл аферентів шкірного нерва на підошві стопи збільшується від медіального до латерального аспектів передньої частини стопи. Контроль комплексу показників індивідуальних ортезів стопи проводиться за допомогою координатно-вимірювальної машини та спеціалізованого програмного забезпечення з метою порівняння результатів вимірювання з характеристиками 3D моделі виробу, величини точності розмірів, форми, взаємного розташування, як складних геометричних форм виробу. Дизайн клінічних апробацій (досліджень): аналіз ходи та постави проводиться за допомогою портативного інерційного датчика (Італія), розташованого в 3D ортезі, під час виконання

хворим тесту «встань та йди» (TUG) та стояння протягом 30 секунд, досліджуються силові характеристики м'язів нижніх кінцівок (застосовується динамометр цифровий з аналоговим вихідом виносний), застосовуються валідовані шкали та тести. Дослідження проводиться тричі – на початку, одразу після двотижневого курсу реабілітації та через три місяці після реабілітації. Методика реабілітації: пацієнтам призначали індивідуальні 3D ортези стопи для ходьби протягом 30 хвилин двічі на день, курс реабілітації складав 2 тижні. Після двотижневого курсу реабілітації хворим було рекомендовано ходьбу з індивідуальними 3D ортезами стопи протягом 30 хвилин один раз на день впродовж 3 місяців. Контрольна група хворих носила звичайне взуття. Для оцінки нормального розподілу кількісних змінних і, таким чином, для визначення типу тесту статистичного аналізу (параметричного чи непараметричного), використовували критерії Колмогорова–Смірнова. Дані перевіряються на значущість за допомогою тесту Вілкоксона зі знаком рангу та критерію Фрідмана. Кореляція між кількісними змінними оцінюється за допомогою критерію Спірмена. Планується дослідити матеріали, що можуть бути використані при виготовленні індивідуальних ортезів стоп за технологіями адитивного виробництва, щодо показників їх придатності виконувати функції медичного призначення під час експлуатації (механічні властивості та знос), а також проведення випробувань цих матеріалів на показники екологічності, біобезпечності, можливості утворення наночастинок та їх токсичності. Аналіз одержуваних масивів експериментальних даних буде проведено за допомогою сучасних інформаційно-вимірювальних систем (акселерометр і гіроскоп; система Raspberry), а також моделюватиметься із застосуванням скінченноелементного аналізу у програмному комплексі ANSYS з подальшим обробленням у програмі MATLAB. Також застосування комплексу, що складається з веб-камер, мобільних пристроїв, персонального комп'ютера і системи датчиків тиску дозволить розробити інформаційно-вимірювальну систему та методику діагностування стану опорно-рухового апарату людини при застосуванні індивідуальних ортезів стопи. Планується створення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для реабілітації різних груп населення з воєнними травмами, що призвели до порушення функцій опорно-рухового апарату, з урахуванням просторової структури стопи, які одержані сенсорами різної фізичної природи, на основі застосування моделей нейронних мереж. Для адитивного виготовлення індивідуальних ортезів стопи з контрольованим складом, структурою, пористістю та міцністю матеріалу в залежності від розмірів та умов навантаження пропонується комплекс взаємопов'язаних методів та засобів аналізу, кластеризації, сегментації та класифікації об'єктів на зображеннях. Використовуються методи аугментації даних. В основі цих методів лежать різні геометричні або піксельні перетворення, які можуть дозволити згенерувати зображення, що схожі на вихідні.

Висновок

Результати досліджень будуть застосовані для створення прототипів лабораторних стендів: для діагностування стану опорно-рухового апарату людини та створення Smart технології щодо необхідності призначення або заміни індивідуальних ортопедичних ортезів стопи, які будуть активно використовуватись у подальших дослідженнях в галузі біоінженерних технологій інституту медичної інженерії Національного університету «Одеська політехніка». Ці стенди також будуть залучатися під час проведення курсів підвищення кваліфікації медичного персоналу з питань діагностування, профілактики, лікування та реабілітації захворювань опорно-рухового апарату на основі застосування індивідуальних ортезів стопи. Результати досліджень в подальшому будуть використовуватися на кафедрі біомедичної інженерії для проведення досліджень сучасних технологій виготовлення виробів щодо можливості забезпечення їх показників продуктивності, енергоефективності, екологічності, безпечності сучасних технологій.

Література

1. Kang, G.E.; Yang, J.; Najafi, B. Does the Presence of Cognitive Impairment Exacerbate the Risk of Falls in People with Peripheral Neuropathy? An Application of Body-Worn Inertial Sensors to Measure Gait Variability. *Sensors* 2020, 20, 1328.
2. Brognara, L.; Navarro-Flores, E.; Iachemet, L.; Serra-Catalá, N.; Cauli, O. Beneficial Effect of Foot Plantar Stimulation in Gait Parameters in Individuals with Parkinson's Disease. *Brain Sci.* 2020, 10, 69.
3. Le Floch, M.; Ali, P.; Asfar, M.; Sánchez-Rodríguez, D.; Dinomais, M.; Annweiler, C. Volumetric Brain Changes in Older Fallers: A Voxel-Based Morphometric Study. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2021, 9, 610426.
4. Ali, P.; Labriffe, M.; Paisant, P.; Custaud, M.A.; Annweiler, C.; Dinomais, M. Associations between gait speed and brain structure in amnesic mild cognitive impairment: A quantitative neuroimaging study. *Brain Imaging Behav.* 2022, 16, 228–238.
5. Schlenstedt, C.; Paschen, S.; Kruse, A.; Raethjen, J.; Weisser, B.; Deuschl, G. Resistance versus Balance Training to Improve Postural Control in Parkinson's Disease: A Randomized Rater Blinded Controlled Study. *PLoS ONE* 2015, 10, e0140584.
6. Canning, C.G.; Paul, S.S.; Nieuwboer, A. Prevention of falls in Parkinson's disease: A review of fall risk factors and the role of physical interventions. *Neurodegener. Dis. Manag.* 2014, 4, 203–221.
7. Lim, I.; van Wegen, E.; De Goede, C.; Deutekom, M.; Nieuwboer, A.; Willems, A.; Jones, D.; Rochester, L.; Kwakkel, G. Effects of external rhythmical cueing on gait in patients with Parkinson's disease: A systematic review. *Clin. Rehabil.* 2005, 19, 695–713.
8. Kleiner, A.; Galli, M.; Gaglione, M.; Hildebrand, D.; Sale, P.; Albertini, G.; Stocchi, F.; De Pandis, M.F. The parkinsonian gait spatiotemporal parameters quantified by a single inertial sensor before and after automated mechanical peripheral stimulation treatment. *Parkinson's Dis.* 2015, 2015, 390512.
9. Kleiner, A.F.R.; Pagnussat, A.S.; Pinto, C.; Marchese, R.R.; Salazar, A.P.; Galli, M. Automated mechanical peripheral stimulation effects on gait variability in individuals with Parkinson disease and freezing of gait: A double-blind, randomized controlled trial. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 2018, 99, 2420–2429.
10. Prusch, J.S.; Pinto, C. Automated mechanical peripheral stimulation and postural control in subjects with Parkinson's disease and freezing of gait: A randomized controlled trial. *Funct. Neurol.* 2018, 33, 206–212.