

DOI: 10.20535/1970.67(1).2024.306890

УДК 681.5

## ДІАГНОСТИЧНІ УСТІЛКИ ЯК ЗАСІБ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕАБІЛІТАЦІЇ НИЖНІХ КІНЦІВОК

Некрасова О. О., Нечай С. О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: [olha02.nekrasova@gmail.com](mailto:olha02.nekrasova@gmail.com), [prilad@ukr.net](mailto:prilad@ukr.net)

Актуальною проблемою сьогодення є потреба у розвитку реабілітаційних засобів, які можуть використовуватись пацієнтом у режимі самообслуговування. Сучасні методи реабілітації нижньої кінцівки часто обмежені доступністю фахівців та вимагають постійного нагляду медичного персоналу. Проблема некоректної постави ноги може призводити до численних ускладнень здоров'я, таких як плоскостопість, що може бути пов'язано з цукровим діабетом та ішемічною хворобою серця. Тому розробка засобу для самостійної діагностики тиску на різні ділянки стопи та контролю корекції є актуальною задачею. Доступність цього засобу сприятиме ефективній реабілітації при порушеннях стану нижніх кінцівок, покращенні постави, уповільнить прогресування низки захворювань.

Попередні дослідження підтверджують важливість активної участі пацієнтів у процесі реабілітації. Тенденція до самостійної корекції вимагає інтегрованих технологій для забезпечення реального часу зворотного зв'язку.

Основна мета – створити можливість коригування положення ноги у взутті за допомогою обробки даних та візуалізації на мобільному застосунку. У роботі представлено розробку автоматизованого реабілітаційного засобу для нижньої кінцівки, а саме електричну принципову схему для засобу. Засіб використовує передові методи обробки даних для точного визначення положення ноги. Аналіз динаміки рухів та взаємодія засобу із областю нижньої кінцівки спрямовані на досягнення максимальної точності та ефективності реабілітації.

Розроблений засіб дозволяє користувачам отримувати інформацію про положення ноги у взутті в режимі реального часу. Мобільний застосунок у смартфоні стає візуальним інтерфейсом, де відображається важлива інформація, яка надає можливість для самостійної корекції постави, техніки бігу, різноманітних фізичних вправ.

Автоматизований реабілітаційний засіб визначає новий етап у розвитку технологій самостійної корекції нижньої кінцівки при плоскостопості. Забезпечуючи пацієнтам інструмент для активного контролю над процесом реабілітації, цей засіб покращує якість життя та зменшує потребу в постійному медичному нагляді. В подальшому буде програмування електричної схеми та розробка застосунку до девайсу по алгоритмам.

**Ключові слова:** технічний засіб; реабілітація; плоскостопість; автоматизація; електрична схема; система діагностики; устілка.

### Вступ

Актуальною проблемою сьогодення є потреба у розвитку реабілітаційних засобів, які можуть використовуватись пацієнтом у режимі самообслуговування. Такий засіб може бути у нагоді кожній людині, яка має проблеми із нижньою кінцівкою при ходьбі. Але також буде актуальна людям із вадами тому, що спостерігається зростання захворювань, пов'язаних з нижніми кінцівками, таких як цукровий діабет та ішемічна хвороба серця, що можуть викликати ушкодження нижніх кінцівок [1]. Реабілітація стає необхідною для відновлення функціональності кінцівок у таких випадках.

Тема технічних засобів реабілітації несе в собі велике значення, особливо з огляду на покращення якості життя осіб із фізичними або когнітивними обмеженнями. Ці засоби виявляються невід'ємною частиною процесу відновлення функцій, які можуть бути втрачені через травми, хвороби чи

інші негативні обставини. При цьому технічні рішення надають пацієнтам з обмеженнями можливість бути більш самостійними та впевненими в собі, що сприяє їхній соціальній інтеграції та можливості приймати активну участь у житті [2–3].

Кожна людина унікальна, і тому індивідуалізація технічних засобів реабілітації є важливим аспектом в їхньому застосуванні. Це дозволяє адаптувати засоби до конкретних потреб та можливостей кожного пацієнта, створюючи персоналізований підхід, що сприяє ефективному процесу відновлення [4].

Отже, створення автоматизованого реабілітаційного засобу для нижньої кінцівки відкриває нові можливості у реабілітації людини в цілому, оскільки від постави залежить багато важливих процесів життєдіяльності.

**Аналіз останніх розробок реабілітаційних**

**засобів для нижньої кінцівки**

Стопа є фундаментом для тіла людини і виконує важливі функції, такі як ресорну (поглинання ударів), балансування (підтримання стійкості) і проштовхування (рухання вперед). Порушення цього фундаменту може негативно впливати на формування організму підростаючої людини і призводити до порушень у виконанні цих основних функцій.

Для того, щоб розробити засіб, проведемо аналіз вже існуючих реабілітаційних засобів для нижньої кінцівки.

Перший пристрій «валик з масажними елементами» [4]. Запропонований пристрій дозволяє при виконанні стопами фізичних вправ:

а) коченням валика вперед-назад викликати резонансні струси підшовної поверхні стопи, чим забезпечуються відразу 2 види масажу – механічний і вібромасаж;

б) котіння дозволяє значно зміцнити зв'язки, які натягують зводи стопи, збільшити кількість структурних одиниць у м'язових волокнах і підвищити їх функціональний стан, витривалість і силу, поліпшити трофіку тканин і їх еластичність.

Другий пристрій вібромасажна «бігова доріжка» слугує для зміцнення функціонального стану стопи, гомілки і стегна [5].

Ця конструкція пристрою вирішує важливі технічні завдання, такі як можливість використання вібрації та масажу для стимуляції ніг та оптимального впливу на центральну нервову систему та залози внутрішньої секреції. Суть запропонованого пристрою полягає у зміні впливу вібромасажного полотна на стопи залежно від напрямку ходи – підняття або спуску пацієнта, з можливістю зміни кута та нахилу полотна завдяки шарнірному встановленню, що дозволяє обертати валик-сходинку. Кожен валик має масажне покриття з горбинками, що дозволяє одночасно масажувати стопи ніг. Частоту вібрації можна регулювати, змінюючи швидкість руху «сходинки». Ця конструкція пристрою може бути корисною для поліпшення стану ніг та стимуляції організму в цілому.

Під час патентного пошуку було виявлено, що в Україні є 3 запатентованих винаходи інтелектуальної власності [6–8]. Перевагами цих винаходів є те, що вони мають: опори-датчики з'єднанні підсилювачем, аналого-цифрові перетворювачі та системи обробки інформації та індикації, це дозволяє оперативно отримувати інформацію про співвідношення навантаження. Недоліки цих винаходів у тому, що у них не передбачено визначення навантаження на передні та задні відділи стопи та можливість змінювати висоту та кут нахилу опорної площадки під скороченою кінцівкою, також неможливо одночасно отримувати відбитки з обох кінцівок, крім того, пристрої складні в обслуговуванні, у пристроїв для плантографії барвник наноситься нерівномірно, тому одержані відбитки стопи неякісні і по них складно проводити аналіз зон

навантаження стоп [9]. Крім, того пристрій негігієнічний тому, що після зняття відбитку необхідно змивати барвник з підшовної частини стопи.

Проаналізувавши всі слабкі і сильні сторони винаходів, ще раз впевнилась у актуальності розробки автоматизованого реабілітаційного засобу для нижньої кінцівки, який зміг би виконувати задачу виявлення неправильної постави нижньої кінцівки та реабілітації цієї проблеми.

Отже, впровадження автоматизації у реабілітаційні засоби дуже актуальне питання та забезпечує сприятливі умови для розробки та подальше використання засобу.

**Постановка задачі**

Метою проведення даного дослідження є розробка та впровадження передових технологій, спрямованих на поліпшення реабілітаційного процесу пацієнтів, які стикаються з вродженими вадами, ушкодженнями чи захворюваннями нижніх кінцівок.

Задачі цього дослідження передбачають наступне:

- Аналіз існуючих технічних засобів для реабілітації (протези, реабілітаційні пристрої та допоміжні технічні засоби, які використовуються для реабілітації).
- Визначення недоліків та викликів (основні недоліки та обмеження існуючих технічних засобів для реабілітації нижніх кінцівок).

Загальна мета дослідження полягає в покращенні якості реабілітації та життя пацієнтів з ушкодженнями нижніх кінцівок шляхом автоматизації процесу та індивідуалізації підходу до кожного пацієнта.

Отже, впровадження автоматизації у реабілітаційні засоби – дуже актуальне питання, що потребує балансу між автоматизацією та результатами показів для забезпечення найкращих показників.

**Розробка прикладу схеми принципової автоматизованого засобу**

Відповідно до мети роботи засіб буде складатись з таких елементів:

- 1) плівковий тензодатчик – він дозволяє трансформувати деформації твердих тіл в електричний сигнал, за яким визначається значення певної величини;
- 2) батарея – забезпечує живлення всього засобу та ефективної його роботи;
- 3) бездротова зарядка – можливість зарядки через напилу плівку;
- 4) вузол зв'язку WI-FI та Bluetooth вбудований у мікросхему – для отримання результатів автоматизованого засобу;
- 5) вбудований датчик температури – вимірює температуру та забезпечує якісну роботу засобу;
- 6) система зарядки акумулятору – контроль заряду батареї;

7) система стабілізації напруги – контроль стабільної подачі напруги та сповіщення про низький рівень батареї.

Запропонований приклад принципової схеми із елементами, які при підборі можуть бути присутні у схемі, представлений рис. 1.

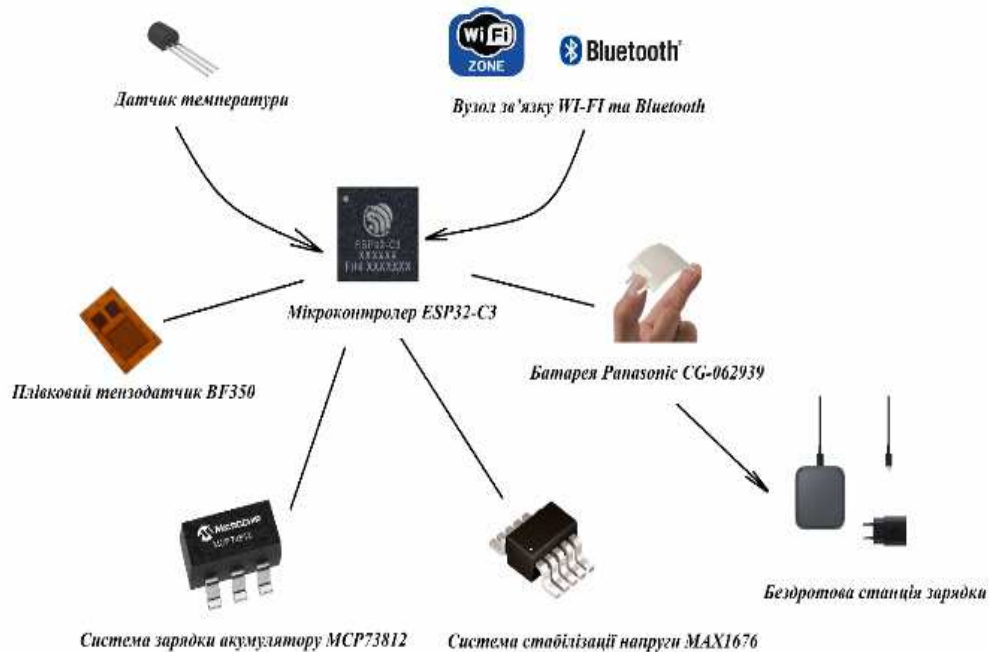


Рис. 1. Приклад схеми принципової з елементами, які можуть бути застосовані у розробці засобу

Тензодатчик представляє собою пружний елемент із нержавіючої сталі, на якому закріплені тензорезистори. На рисунку 2 представлено структурну схему тензодатчика. Вимірювальна сила  $F$  за допомогою пружного елемента перетворюється в деформацію  $\delta$ . Деформація пружного елемента сприймається тензорезистором і перетворюється в вимірювальний опір  $\epsilon_r$ , який у вимірювальній ланці перетворюється у величину вихідної напруги [10]. У електричній схемі відбувається порівняння балансів тисків і після цього виводиться на екран смартфона, для цього буде розроблений мобільний застосунок.

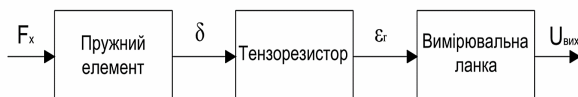


Рис. 2. Структурна схема

Тензорезистивний ефект, що дозволяє фіксувати зміни електричного опору в твердих провідниках або напівпровідникових пластинах при їх стисненні або розширенні, пов'язаний з деформаційними впливами на атомну структуру матеріалу.

#### Розробка електричної принципової схеми

У процесі створення схеми передбачається використання двох провідників, які будуть з'єднані з антеною та сполучені з діодним мостом. В якості елементів діодного мосту вибрані вбудовані діоди Шоттки з метою мінімізації втрат, пов'язаних із

діодами. Після випрямлення і обмеження напруги за допомогою стабілітрона, живлення подається на мікросхему MCP73812 [11], яка відповідає за процес заряджання акумулятора та має внутрішній обмежувач струму на рівні 50 мА. Подальше живлення від батареї подається на стабілізатор живлення з вихідною напругою 3.3 В, представлений мікросхемою MAX1676 [12].

Мікросхема також включає в себе внутрішній компаратор живлення, який може відправити сигнал про зниження напруги живлення батареї до мікросхеми ESP32-C3 [13]. Слід зазначити, що цей стабілізатор може оптимально функціонувати при зниженні напруги батареї до 1 В. Мікросхема ESP32-C3 виконує всі ключові функції даного проекту. Вона проводить виміри падіння напруги тензорезисторів, встановлює зв'язок зі смартфоном через WI-FI або Bluetooth та передає дані від сенсора температури та рівня заряду акумулятора.

Стандартно ESP32-C3 налаштована на два входи АЦП, але за допомогою відповідного налаштування це число можна розширити до шести, що дозволяє ефективно взаємодіяти з більшим числом датчиків. Для економії енергії використовується почергове опитування даних з датчиків, включення живлення зв'язкового модему всередині мікросхеми, коротка передача пакета і вимкнення модему для максимальної економії енергії, після чого процесор очікує наступного циклу. Це забезпечує мінімальне споживання енергії, достатньо приблизно 5 циклів на секунду.

Запуск вимірювальних циклів відбувається

при різкому перепаді тиску на тензорезистори, наприклад, коли людина стоїть на ногах або опирається однією ногою під час руху. Цей засіб можна уявити як багатошаровий "пиріг".

Знизу розташований ізолюючий шар устілки, який може бути виконаний з таких матеріалів, як шкіра, поліуретан чи зносостійка цупка тканина.

Далі йде шар плівки, з напиленням провідником – антеною. Наступний шар містить основну електронну схему.

На рис. 3 зображено схематичне розміщення зони, куди можна помістити електронну схему. Електронна схема знаходиться у западині під коротким м'язом розгиначем великого пальця стопи (лат. *extensor hallucis brevis*). Таке розміщення обране, тому що ця зона піддається найменшій деформації елементів електричної схеми.

Далі йде шар із акумулятором, а останнім є захисний шар, який може бути виготовлений з аналогічного матеріалу, який був використаний у нижньому шарі.

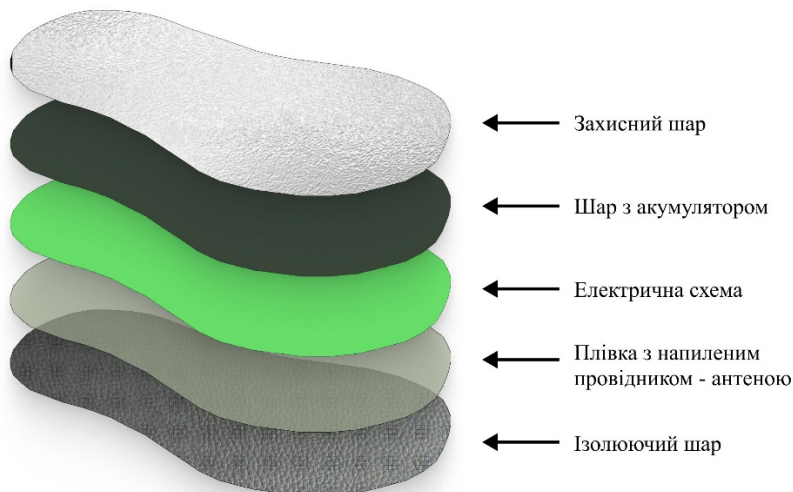


Рис. 4. Приклад розташування шарів у засобі

Для оптимальної роботи засобу та відображення результатів потрібно додатково розробити мобільний застосунок, який буде зв'язуватись із засобом для передачі даних за допомогою Bluetooth або WI-FI модулів. У застосунку на смартфоні важливо налаштувати діапазон нерівномірності тиску, оскільки ступінь зміщення по "устілці" може відрізнитися під час переміщення людини.

Проведення численних тестів з різними варіантами плоскостопості, з урахуванням вікових, зростових та вагових відмінностей між людьми, є абсолютно необхідним. Без цих тестів неможливо визначити, як тиск на стопу людини змінюється при переході на різні сенсори устілки.

Також слід враховувати внутрішню температуру взуття, оскільки це може впливати на показники тензодатчиків. Зовнішній вигляд інтерфейсу застосунку на смартфоні може бути як мінімаліс-

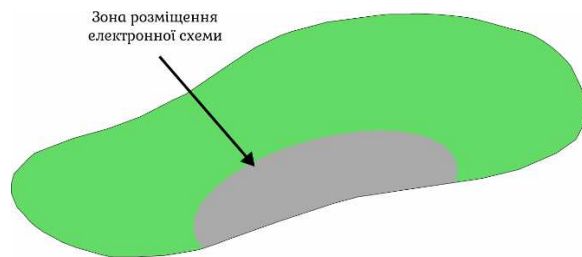


Рис. 3. Схема розміщення зони під електронну схему

Всі ці шари надійно з'єднані водонепроникним клеєм, і можна додатково застосувати тонкий шар гнучкого силікону на шар з електричною схемою, що додатково збільшить водонепроникність засобу.

Приклад послідовності розташування шарів відображено на рисунку 4.

тичним, так і більш розвиненим, з виведенням інформації про температуру, реальне положення стопи та текстовими рекомендаціями.

#### Отримані результати та їх обговорення

У результаті розробки схем принципів та проектування засобу було встановлено переваги використання саме цього засобу для реабілітації:

- 1) Легкість та зручність у використанні надає користувачу швидке пристосування до засобу та реабілітацію;
- 2) Самостійна реабілітація для пацієнта без витрачання часу на постійні візити до реабілітологів;
- 3) Засіб дає максимальні переваги для користувача, для цього зроблена автоматизація з мобільним додатком та бездротова зарядка засобу, що дуже зручно у використанні.

Отримані у даній роботі результати дозволяють розробити мобільний застосунок, призначений для автоматизації системи та моніторингу показників [14].

### Висновки

Запропонована розробка автоматизованого реабілітаційного засобу нижньої кінцівки дозволить проводити більш ефективне лікування, сприятиме зменшенню часу на проходження фізичної реабілітації та полегшить роботу лікарів та фахівців у цій сфері. Застосування подібного комплексу електричної схеми в устілці та застосунку, що відображає оброблені дані, які надходять з мікроконтролера, який проводить первинну обробку датчиків, показників температури та напруги живлення, дозволить реалізувати нову розробку реабілітаційного засобу для нижньої кінцівки. Передача даних може застосовувати протоколи WI-FI або Bluetooth, що відображає використання сучасних засобів зв'язку. Використання безконтактної зарядки акумулятора дозволить досягти зручності пацієнта, а також уникнути потреби виготовлення спеціального взуття, що додатково зменшує собівартість цього засобу.

Враховуючи потребу у впровадженні передових технологій для поліпшення реабілітаційного процесу для всіх пацієнтів, застосування такого засобу дозволить самостійно контролювати поставу, положення ноги при плоскостопості, проходити реабілітацію швидше та покращити якість життя.

Розробка та впровадження автоматизованого реабілітаційного засобу для нижньої кінцівки є науково важливим кроком, відкриваючи можливість для вивчення та розуміння процесів відновлення у пацієнтів з різними руховими порушеннями. Дослідження цих систем дозволяє: аналізувати вплив різних параметрів на ефективність реабілітації, сприяє розвитку нових методів лікування та наукових досліджень у фізіотерапії та реабілітаційній медицині. Використання автоматизації в цьому контексті допомагає збирати об'єктивні дані та підвищує якість життя пацієнтів із руховими порушеннями.

Перспективи дослідження включають розвиток дистанційного моніторингу, що дозволить лікарям та фахівцям в області реабілітації ефективно віддалено контролювати процес відновлення та надавати рекомендації пацієнтам у реальному часі, для цього реабілітаційний засіб збирає показники даних з датчиків, які передаються фахівцям для аналізу. Медичні фахівці мають доступ до цих даних в реальному часі, що дозволяє їм оперативно реагувати на будь-які зміни у стані пацієнта. Це покращує ефективність лікування та дозволяє фахівцям надавати рекомендації у режимі онлайн. Такий підхід особливо корисний для тих пацієнтів, які не можуть постійно відвідувати лікаря чи фахівця у центрі реабілітації. Він дозволяє проводити дистанційні консультації та робити висновки щодо

стану здоров'я. Загалом, цей підхід відкриває нові можливості для забезпечення якісної та доступної реабілітації.

### Література

- [1] О. В. Бісмак, Н. Г. Мельнік. Основи фізичної реабілітації: навч. посіб. Харків, Україна: Вид-во Бровін О. В., 2010.
- [2] Фізична, реабілітаційна та спортивна медицина: підручник для студентів і лікарів; за заг. ред. В. М. Сокрута. Краматорськ, Україна: Каштан, 2019.
- [3] Н. І. Коцур, Л. П. Товкун, «Порушення постави в учнів середнього шкільного віку та її корекція засобами фізичної реабілітації», *Young Scientist*, №4.1, (68.1), с.47-52, 2019.
- [4] І. І. Петрушевський, С. М. Канішевський, А. П. Лапутин, А. А. Архипов, «Пристрій для тренування м'язів стопи і гомілки», Авт. св. №1766435, 07.10.1992.
- [5] А. М. Цициков, А. Ю. Ковтун, «Пристрій для тренування ніг», Авт. св. СРСР, №1516132, 23.10.1989. БИ 39.
- [6] З. М. Мітелева, В. В. Органов, М. Ю. Карпінський, Д. А. Мітелев, Ю. Я. Кокоровець, З. І. Нікітіна, «Пристрій для визначення умов однакового навантаження стоп людини при різній довжині нижніх кінцівок», пат. 34360 Україна: МПК А61В 5/103. № 99063676, заявл. 30.06.1999; опубл. 15.02.2001, Бюл. №1.
- [7] І. А. Лазарев, Д. І. Білоус, «Пристрій для оцінки розподілу навантажень на плантарній поверхні стопи», пат. 102998 Україна: МПК А61В 5/103. № а200911339, заявл. 09.11.2009; опубл. 10.09.2013, Бюл. №17.
- [8] А. Д. Салєєва, «Пристрій для плантографії», пат. 71296 Україна: МПК А61В 5/107. № 20031211823; заявл. 18.12.2003; опубл. 15.11.2004, Бюл. №1.
- [9] Плоскостопість: причини, симптоми, ступеня, види, чим небезпечно. Garvis 2021 р. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://garvis.com.ua/uk/ploskostopie/>
- [10] Перетворювачі механічних величин в електричні. Консп. лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», ОПП «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 3,5 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 156 с.
- [11] MCP73811/2. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22036b.pdf>
- [12] MAX1676 DataSheet. [Електронний ресурс]. Доступно:



<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/72897/MAXIM/MAX1676.html>  
 [13] ESP32-C3 Datasheet. [Електронний ресурс]. –  
 Доступно:  
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1424859/ESPRESSIF/ESP32-C3.html>

[14] В. І. Козявкін, І. П. Маргосюк, С. М. Гордієвич, О. О. Качмар, “Системи моніторингу в медичній реабілітації”, у *Основи медико-соціальної реабілітації дітей з органічними ураженнями нервової системи*, Київ, Україна: Інтермед, 2005, с.183-185.

UDC 681.5

**O. O. Nekrasova, S. O. Nechai***National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv Ukraine***AUTOMATED REHABILITATION TOOL FOR THE LOWER LIMB**

An urgent problem today is the need to develop rehabilitation tools that can be used by the patient in self-care mode. Modern methods of rehabilitation of the lower limb are often limited by the availability of specialists and require constant supervision by medical personnel. The problem of incorrect foot posture can lead to numerous health complications, such as flat feet, which can be associated with diabetes and coronary heart disease. Therefore, the development of a tool for self-diagnosis of pressure on different areas of the foot and control of correction is an urgent task. The availability of this tool will contribute to effective rehabilitation in case of disorders of the lower limbs, improve posture, and slow down the progression of a number of diseases.

Previous studies confirm the importance of active participation of patients in the rehabilitation process. The trend toward self-correction requires integrated technologies to provide real-time feedback.

The main goal is to create the ability to adjust the position of the foot in shoes using data processing and visualization on a mobile application. The work presents the development of an automated rehabilitation tool for the lower limb, namely the electrical schematic diagram for the tool. The device uses advanced data processing methods to accurately determine the position of the foot. The analysis of the dynamics of movements and the interaction of the tool with the leg area are aimed at achieving maximum accuracy and efficiency of rehabilitation.

The developed tool allows users to receive information about the position of the foot in the shoe in real time. The mobile application in the smartphone becomes a visual interface that displays important information that provides an opportunity for self-correction of posture, running technique, and various physical exercises.

The automated rehabilitation tool defines a new stage in the development of technologies for self-correction of the lower limb in case of flat feet. By providing patients with a tool to actively control the rehabilitation process, this tool improves quality of life and reduces the need for ongoing medical supervision. In the future, there will be programming of the electrical circuit and development of the application for the device according to algorithms.

**Key words:** technical means; rehabilitation; flat feet; automation; electric circuit; diagnostic system; insole.

*Надійшла до редакції  
11 січня 2024 року*

*Рецензовано  
12 лютого 2024 року*



© 2024 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).