ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

УДК: 614.253.52:159.944.4

ВИКОРИСТАННЯ МОТОРНОЇ УЯВИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РУХОВИХ НАМІРІВ У ЛЮДЕЙ З ПОРУШЕННЯМИ РУХОВИХ ФУНКЦІЙ КІНЦІВОК (огляд літератури)

Соловей С.Р., Барабанов О.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Інтерфейси мозок-комп'ютер (Brain-Computer Interface, BCI) є перспективним напрямом у нейроінженерії та реабілітаційній медицині, зокрема для пацієнтів із порушеннями рухових функцій, спричиненими ампутацією кінцівок або неврологічними ураженнями. Одним із ключових підходів у цій сфері є використання моторної уяви (Motor Imagery, MI) для визначення рухових намірів, що дозволяє ефективно керувати протезами та нейротехнологічними пристроями. Дана робота аналізує сучасні методи інтеграції MI у реабілітаційні процеси, зокрема її застосування у відновленні рухових функцій після ампутації. Особлива увага приділяється механізмам детекції рухових намірів за допомогою ЕлектроЕнцефалоГрафії (ЕЕГ), зокрема синхронізації та десинхронізації, пов'язаних з певними подіями (Event Related Desynchronization, ERD та Event Related Synchronization, ERS), які є основними характеристиками сенсомоторних ритмів під час уявного руху. Розглянуто експериментальні дослідження, що оцінюють ефективність MI у реабілітації та керуванні протезами. Проаналізовано застосування MI для зменшення фантомного болю та покращення соматосенсорної кортикальної організації а також контролю протезів нижніх кінцівок, забезпечуючи природне відчуття рухів навіть у складних умовах. Розглянуто основні виклики, пов’язані з низьким співвідношенням сигнал/шум в ЕЕГ та індивідуальними відмінностями в MI-здібностях пацієнтів. Результати аналізу підтверджують, що технології MI можуть суттєво покращити якість життя осіб із порушеннями рухових функцій, сприяючи як фізичному, так і когнітивному відновленню. Перспективні напрями подальших досліджень включають оптимізацію алгоритмів розпізнавання рухових намірів, підвищення точності ЕЕГ-інтерпретації та розширення можливостей MI у керуванні складними протезними системами.

Ключові слова: *інтерфейс мозок-комп’ютер, нейропластичність, реабілітація після ампутації, прогнозування рухового наміру, фантомний біль.*

Відповідальний автор: Соловей С.Р.
✉ Україна, 01033, м. Київ,
вул. Володимирська, 64/13, к. 35.
E-mail: maximum.lenovo.ml@gmail.com

Corresponding author: Solovei S.
✉ Ukraine, 01033, Kyiv,
Volodymyrska str., 64/13, r. 35.
E-mail: maximum.lenovo.ml@gmail.com

🅭 Соловей С.Р., Барабанов О.В., 2025 CC BY-NC-SA 🅭 Solovei S., Barabanov O., 2025

ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

Цитуйте українською: Соловей СР, Барабанов ОВ. Використання моторної уяви для визначення рухових намірів у людей з порушеннями рухових функцій кінцівок (огляд літератури). Експериментальна і клінічна медицина. 2025;94(2):11с. In press. https://doi.org/10.35339/ekm.2025.94.2.sob

Cite in English: Solovei S, Barabanov O. Using motor imagery for movement intention detection in individuals with limb motor function impairments (literature review). Experimental and Clinical Medicine. 2025;94(2):11p. In press. https://doi.org/10.35339/ekm.2025.94.2.sob [in Ukrainian].

Вступ

Термін «інтерфейс мозок-комп'ютер» (Brain-Computer Interface, BCI) був офіційно визначений у червні 1999 року на Першій міжнародній конференції з технологій BCI як «...система комунікації, що не залежить від нормальних вихідних шляхів мозку через периферичні нерви та м'язи» [1]. На той момент це визначення було створене для відмежування BCI від інших допоміжних комунікаційних пристроїв, які використовують залишкові моторні шляхи, такі як рухи обличчя або очей. З того часу інтерес до BCI значно розширився, і сьогодні вони використовуються не тільки як засоби комунікації, а й для розширення моторних, сенсорних та інших функцій.

У зв'язку з цим BCI стали важливим напрямом у галузі нейроінженерії та реабілітаційної медицини. Вони є системами, що дозволяють керувати зовнішніми пристроями на основі інформації, отриманої з центральної нервової системи. Технології BCI пропонують нові нейроінженерні рішення для реабілітації пацієнтів, які зазнали ампутації або нейрологічних ушкоджень, і тому активно впроваджуються в стратегії лікування та реабілітації для широкого кола пацієнтів.

Однією з ключових задач є детекція чи прогнозування рухового наміру за допомогою ЕлектроЕнцефалоГрафії (ЕЕГ). Дослідження у цій сфері демонструють різний рівень точності розпізнавання, що залежить від застосованих методів аналізу сигналів.

Серед методів детекції рухового наміру особливу увагу привертає моторна уява (Motor Imagery, MI), оскільки вона активує ті ж самі нейронні мережі, що й реальні рухи, що робить її перспективним інструментом у BCI-системах [2]. Використання MI у реабілітації базується на здатності мозку до нейропластичності, що сприяє покращенню моторних навичок навіть без фізичної активності [3; 4]. У зв'язку з цим, MI розглядається як перспективний інструмент не лише для фізичної реабілітації, але й для загальної нейрокогнітивної стимуляції, активуючи області, пов'язані з увагою, пам'яттю та прийняттям рішень.

Цей підхід особливо цінний у випадках, коли фізичні вправи є неможливими через втому або фізичні обмеження, MI пропонує альтернативний, маловитратний метод відновлення. Хоча ефективність MI у відновленні рухової активності була підтверджена для осіб із неврологічними порушеннями, такими як інсульт чи хвороба Паркінсона, дослідження впливу MI на пацієнтів із периферичними ушкодженнями, зокрема після ампутації, залишаються обмеженими. Однак, є дані про те, що здатність до моторної уяви у таких пацієнтів зберігається.

ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

Наприклад, у дослідженні [5] визначено, що після ампутації верхньої кінцівки нейронні мережі, які відповідають за МІ, залишаються активними, і ця активність відрізняється від тієї, що виникає під час спроби руху фантомною кінцівкою. Крім того, збережена точність та відповідність часу уявного руху реальному виконанню дозволяють використовувати МІ у реабілітації осіб після ампутації [6].

Таким чином, експериментальні дослідження підтверджують, що процес реабілітації пацієнтів після ампутації може ефективно використовувати технології МІ, хоча чіткість і точність можуть бути порушені, особливо для складних рухів. Водночас чіткість і точність рухових уявлень можуть бути порушені, особливо для складних рухів. Використання протеза, у свою чергу, сприяє швидкому покращенню показників МІ як для одиничних рухів суглобів, так і для ходьби [7].

Загальновідомо, що ампутація має значний вплив на якість життя пацієнтів. Фізично це призводить до труднощів у мобільності та функціональності, а також до болю та фантомних відчуттів. Психологічно, наслідки можуть бути серйозними, викликаючи депресію, тривожність і посттравматичний стресовий розлад. Пацієнти з ампутованими кінцівками часто стикаються зі стигматизацією та соціальними труднощами [8]. Окрім цього, ампутація також має значний економічний вплив, зокрема через високі медичні витрати. Багато пацієнтів також стикаються з труднощами повернення до роботи, що призводить до зниження доходів і фінансової нестабільності.

З огляду на складність адаптації осіб із порушеннями рухових функцій кінцівок, виникає необхідність у нових методах реабілітації, що можуть покращити як фізичний, так і когнітивний стан пацієнтів. У цьому контексті МІ є перспективним інструментом, оскільки дозволяє активувати відповідні нейронні мережі без фізичного руху. Використання МІ для визначення рухових намірів відкриває можливості для ефективного керування протезами та нейротехнологічними пристроями, що значно розширює можливості реабілітації. Враховуючи зростаючу роль технологій мозок-комп'ютер та їхній потенціал у відновленні моторних функцій, дослідження механізмів МІ є надзвичайно актуальним завданням сучасної нейронауки та реабілітаційної медицини.

Метою дослідження був пошук і аналіз сучасних досліджень щодо використання моторної уяви для детекції рухових намірів за допомогою електроенцефалографії у контексті реабілітації осіб з ампутаціями та неврологічними ураженнями.

Матеріали і методи

У дослідженні застосовано бібліографічний аналіз наукової літератури щодо використання моторної уяви у системах BCI для детекції рухових намірів. Інформаційна вибірка базувалася на рецензованих статтях та конференційних матеріалах з баз даних IOPscience, Sage Publications, Frontiers Media, IEEE Xplore, Springer Nature та MDPI. Відбір здійснювався за ключовими словами *brain-computer interface, motor imagery, EEG, movement intention detection* з акцентом на експериментальні та клінічні дослідження останніх 10 років.

Результати та їх обговорення

Інформація про технологію управління протезами за допомогою ЕЕГ є необхідною для кращого розуміння подальших досліджень. Знання принципів роботи інтерфейсу мозок-комп'ютер, механізмів обробки мозкових сигналів та особливостей моторної уяви дозволяє ефективно оцінювати результати експериментальних досліджень у сфері BCI

ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

та нейрореабілітації. Це, у свою чергу, сприяє вдосконаленню сучасних підходів до відновлення рухових функцій у пацієнтів із порушеннями кінцівок.

Система керування протезами на основі ЕЕГ використовує мозкові хвилі, які фіксуються за допомогою ЕЕГ-приладів, і перетворює їх на виконавчі команди через інтерфейс BCI. Центральна концепція технології BCI полягає у створенні каналу зв'язку, який перетворює активність мозку на механічні дії для протезів. Техніка реєстрації ЕЕГ відома своєю ефективністю та економічністю. Вона полягає в розміщенні декількох електродів на шкірі пацієнта для виявлення церебральних сигналів [9]. Однак одним із викликів використання ЕЕГ є її схильність до електричних перешкод, включаючи біоелектричні сигнали, такі як ЕКГ, що призводить до відносно низького співвідношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR). В результаті сигнали ЕЕГ мають низьку амплітуду, зазвичай виміряну в мікровольтах, та частотний діапазон від 1 Гц до 100 Гц. Для захоплення сигналів ЕЕГ переважно використовуються неінвазивні методи, хоча в деяких випадках також можуть застосовуватися інвазивні методи що реалізуються за допомогою спеціалізованих електродів, що кріпляться до кори головного мозку або навіть вставляються всередину мозку [9]. Інвазивні нейровізуалізаційні методи надають точні сигнали для контролю протезів, але мають ризики, такі як інфекції та складні хірургічні втручання, тому дане дослідження зосереджується виключно на неінвазивних методах, які більше застосовуються через свою безпеку та зручність.

Система на основі ЕЕГ використовує мозкові сигнали для керування рухом протеза, перетворюючи мозкову активність на виконувані команди через технологію BCI. Як результат, ампутанти отримують відчуття відновленої автономії, подібне до природної функціональності їхніх кінцівок. Крім того, ця технологія дозволяє їм відчувати дотикові відчуття через протезну кінцівку [10].

Щоб ефективно керувати протезами за допомогою ЕЕГ, важливо враховувати механізми, що лежать в основі формування мозкових сигналів, зокрема процеси, пов'язані з моторною уявою. Уявлення руху викликає специфічні зміни в електричній активності моторної кори, що проявляються у вигляді сенсомоторних ритмів (Sensorimotor Rhythm, SMR). Ці зміни можна зафіксувати за допомогою ЕЕГ та використати для визначення намірів користувача, що є ключовим аспектом ефективної роботи інтерфейсу мозок-комп'ютер. Збільшення та зменшення осцилюючої активності в певному частотному діапазоні називаються синхронізацією, пов'язаною з подією (Event-Related Synchronization, ERS), та десинхронізацією, пов'язаною з подією (Event-Related Desynchronization, ERD), відповідно. Найважливішими частотними діапазонами для моторного уявлення є альфа- та бета-хвилі мозку. Активність, викликана уявленням руху лівої та правої руки, генерується в зонах C3 та C4 мозку відповідно, тоді як уявлення руху стопи генерується із зони Cz. Рухи лівої та правої стоп майже неможливо відрізнити за даними ЕЕГ, оскільки відповідні кортикальні області розташовані надто близько. Кортикальні області повинні бути достатньо великими, щоб генерувати відмінні патерни на фоні ЕЕГ. Кортикальні області лівої руки, правої руки, язика та стопи є великими та відмінними. Отже, рух цих частин тіла шляхом уявлення можна контролювати за допомогою BCI-застосувань [11].

MI є перспективним підходом у реабілітації осіб із порушеннями рухових функцій. Різні дослідження підтверджують ефективність MI, реєструючи елек-

ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

трофізіологічні зміни за допомогою методів нейровізуалізації, таких як ЕЕГ. У цьому розділі буде розглянуто низку експериментальних досліджень, що оцінюють вплив моторної уяви в різних умовах, зокрема серед здорових учасників і пацієнтів із неврологічними порушеннями.

На основі аналізу наукових праць можна виділити кілька основних категорій експериментальних досліджень, що оцінюють застосування моторної уяви для визначення рухових намірів у людей з порушеннями рухових функцій кінцівок.

Експерименти засновані на процесі уявної моторики – це експерименти, у яких учасники виконують лише уявні рухи без їхнього реального виконання. Основна мета таких досліджень – аналіз когнітивних механізмів моторного уявлення та його впливу на мозкову активність. Наприклад, дослідження [9] продемонструвало можливість використання BCI для керування протезованими кінцівками на основі сигналів ЕЕГ.

Дослідження, що поєднують уявну моторику з активними рухами, спрямовані на порівняння нейрофізіологічних механізмів уявної та фізичної моторики. Такий підхід дозволяє оцінити, як мозок адаптується до взаємодії між уявними та реальними рухами.

Експерименти, що вивчають намір руху в поєднанні з активними рухами, фокусуються на реєстрації мозкової активності під час формування рухового наміру та його виконання. Основна мета – виявлення патернів нейронної активності, що передують ініціації руху. Так, експеримент Rea M. et al. [12] підтвердив можливість прогнозування рухових намірів у пацієнтів після інсульту, що є важливим для розробки адаптивних BCI-систем.

Результати досліджень підкреслюють важливість моторної уяви у реабілітаційних технологіях та BCI-системах. Перспективними напрямками розвитку є покращення алгоритмів обробки ЕЕГ-сигналів для підвищення точності BCI, використання адаптивного навчання для персоналізації BCI-застосувань, а також впровадження комплексних BCI-систем у реабілітацію осіб із порушеннями рухової функції.

Загалом, ці дослідження сприяють розвитку нейротехнологій та створенню ефективних методик відновлення рухових функцій у пацієнтів із неврологічними порушеннями.

Перейдемо до аналізу першої категорії досліджень.

Al-Quraishi M.S. et al. [9] зареєстрували сигнали десинхронізації, пов'язаної з подією, за допомогою ЕЕГ у трьох здорових добровольців та чотирьох пацієнтів із травмою спинного мозку. В експерименті застосовували технології уявної моторики для керування протезованим коліном. Учасники виконували завдання, що включали уявну ходьбу та стан спокою, при цьому візуальна стимуляція здійснювалася за допомогою екрана.

Результати дослідження показали, що пацієнти з травмою спинного мозку здатні використовувати неінвазивний BCI-контроль для керування віртуальним аватаром, що імітує ходьбу, що вказує на потенціал для подальшої інтеграції BCI-технологій у реабілітаційні екзоскелетні системи.

Дослідження підтвердило, що використання BCI на основі ЕЕГ для керування екзоскелетами та іншими допоміжними пристроями є перспективним підходом до нейрореабілітації. Довготривале навчання BCI сприяє нейропластичності та може допомагати у відновленні рухових функцій у пацієнтів із порушеннями рухових функцій кінцівок. Крім того, отримані дані вказують на важливість аналізу розподілу кортикаль-

ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

ної активності для розробки ефективних реабілітаційних протоколів.

Do A.H. et al. [13] зареєстрували сигнали ЕЕГ із частотою дискретизації 256 Гц у двох учасників: одного здорового та одного з параплегією, спричиненою травмою спинного мозку. Учасники виконували завдання кінетичної уявної моторики (Kinesthetic Motor Imagery, KMI), спрямоване на управління системою на основі BCI для ходьби по лінійній траєкторії. Для контролю можливого впливу довільних рухів ніг у здорового учасника додатково реєстрували електроміографічні сигнали.

Результати дослідження показали, що протези для нижніх кінцівок, керовані BCI, є технічно здійсненними. Обидва учасники змогли вперше та з високою точністю контролювати систему BCI для ходьби, причому учасник із травмою спинного мозку досяг цього після всього 10-хвилинної сесії навчання. Висока точність класифікації моделей ЕЕГ прогнозу підтверджує ефективність підходу. Учасник із параплегією не лише швидко опанував управління, але й продемонстрував вищі показники продуктивності порівняно зі здоровим учасником.

Ці результати підкреслюють перспективність BCI-контрольованих протезів для відновлення рухових функцій кінцівок. Дослідження підтвердило, що інтуїтивні стратегії управління, засновані на уявній моториці, можуть бути ефективними для реабілітації та розробки нових систем BCI-протезування.

Аналіз другої категорії досліджень розпочнемо з дослідження [14], де Ferrero L. et al. вивчали MI для реабілітації порушених рухових функцій за допомогою BCI для керування екзоскелетом. На етапі калібрування у дослідженні порівнювалися результати контрольної групи та групи з використанням віртуальної реальності (Virtual Reality, VR).

Контрольна група проходила 11 статичних та 11 рухових випробувань, тоді як VR-група мала попередню фазу у VR-середовищі, після чого виконувала лише шість статичних та шість рухових випробувань. Це дозволило зменшити фізичне навантаження на учасників VR-групи завдяки меншій кількості випробувань з екзоскелетом.

Було встановлено, що VR-група показала кращі результати у рухових випробуваннях, хоча у статичних випробуваннях значних відмінностей не спостерігалося. Це підкреслює, що використання VR може бути корисним як менш енерговитратна альтернатива. Крім того, поєднання VR та калібрування зробило тренування менш монотонним, підвищуючи мотивацію учасників.

Під час фази замкненого циклу (closed-loop control) BCI використовував дві моделі: статичну (Static) для стану спокою та рухову (Motion) для активного руху з екзоскелетом. Модель Motion показала кращу продуктивність у обох групах, що пов'язано з високим показником помилкових позитивних реакцій у моделі Static. Особливо це проявлялося, коли учасники мали контролювати екзоскелет у стані спокою, що не тренувалося на етапі калібрування.

Результати одного з пацієнтів показали позитивну динаміку під час калібрувальної фази, тоді як пацієнт іншого не продемонстрували такого ж ефекту навчання, ймовірно через більш серйозне порушення рухових функцій спричинених травмою спинного мозку (Spinal Cord Injury, SCI). Важливо зазначити, що обидва пацієнти мали неповне SCI, але у другого пацієнта ураження було більшим.

Результати даного дослідження підтверджують ефективність застосування MI та BCI для реабілітації рухових функцій кінцівок. А інтеграція VR підходу із скороченою фазою калібрування має

ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

додаткові переваги, адже не лише знижує фізичне навантаження, а й підвищує ефективність системи у рухових випробуваннях.

Наступне дослідження що потребує уваги Murphy D.P. et al. [10], де було досліджено можливість використання технологій уявної моторики для керування протезом нижньої кінцівки за допомогою BCI-системи. Експеримент проводили на 36-річному чоловікові після правобічної трансфеморальної ампутації. Реєстрація ЕЕГ-сигналів у діапазоні 1–100 Гц здійснювалася за допомогою неінвазивних електродів, а для покращення провідності використовували провідний гель. Додатково застосовували два датчики гіроскопа та акселерометра.

Протягом десяти візитів пацієнт проходив тестові сесії з використанням протеза. Під час першого візиту його навчали використовувати BCI-систему для керування механізмом блокування колінного суглоба. Тренування складалося з двох етапів: на першому пацієнт виконував уявні рухи ампутованої кінцівки, що дозволило визначити параметри для прогнозування наміру руху. На другому етапі ці параметри використовували для управління протезом у режимі реального часу під час ходьби на паралельних брусах. Система активувалася лише на основі сигналів ЕЕГ, без залучення додаткових датчиків.

Результати дослідження підтвердили, що неінвазивні сигнали ЕЕГ можуть успішно використовуватися для керування протезом нижньої кінцівки. Система дозволила пацієнту здійснювати свідомий контроль над блокуванням та розблокуванням колінного суглоба, що відображає природні механізми управління рухом. Це принципово відрізняється від електроміографічних систем, які реагують на зміну режиму ходьби лише після її здійснення. Використання BCI-технології забезпечило більш швидку реакцію, зменшення ймовірності помилок та потреби у фізичних зусиллях користувача.

Крім того, результати експерименту показали, що пацієнт набув впевненості у використанні системи без відчуття підвищеного ризику. Водночас у пізніших випробуваннях спостерігалася деяка втрата ефективності, що могло бути пов'язано з ментальною втомою або змінами у провідності електродів. Подальші дослідження мають включати вдосконалення методів фільтрації сигналу, розширення тестування на складніших умовах (наприклад, сходах або нерівній поверхні) та створення бездротових систем для більш комфортного використання.

Таким чином, це дослідження демонструє перспективність BCI-систем для керування протезами нижніх кінцівок. Впровадження подібних технологій дозволить покращити якість життя осіб з ампутаціями, надавши їм більш природний і ефективний спосіб управління протезами без необхідності зовнішніх сенсорів або м'язової активності.

Підчас аналізу третьої категорії досліджень ми звернули особливу увагу на роботу Rea M. et al. [12], у якій показаний вплив уявної моторики на мозкову активність у семи праворуких пацієнтів (чотири чоловіки та три жінки) із хронічним інсультом; середній вік учасників становив 54,7 року. Для участі у дослідженні потрібно було, щоб минуло не менше 12 місяців після інсульту, не було інших неврологічних або психіатричних порушень, а також пацієнти могли розуміти й виконувати інструкції.

Під час експерименту учасники сиділи та виконували уявні й реальні рухи ногою. Вчені реєстрували активність мозку за допомогою ЕЕГ та додаткових датчиків ЕМГ.

Результати показали, що підготовка до руху, навіть уявного, активує різні ділянки мозку, особливо у премоторній та

ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

тім'яній корі. Це означає, що мозок пацієнтів після інсульту може використовувати додаткові ресурси для відновлення рухів. Коли дослідники аналізували сигнали мозку, вони змогли з 67,77 % точністю розрізнити, чи готувався пацієнт до руху здоровою чи ураженою кінцівкою.

Ці результати підтверджують, що уявна моторика може бути корисною для реабілітації після інсульту. Вони також підкреслюють потенціал технологій BCI у відновленні рухових функцій.

Delisle-Rodriguez D. et al. [15] досліджували сигнали ЕЕГ у частотних діапазонах 8–24 Гц у десяти здорових добровольців віком від 21 до 36 років. Учасники виконували завдання уявної моторики та активного руху, що включало уявне педалювання протягом п'яти секунд із подальшим виконанням реального руху. Для контролю відсутності м'язових скорочень реєстрували електроміографічні сигнали, а послідовність рухів педалювання та ходьби візуалізувалася на екрані.

Результати дослідження підтвердили ефективність використання уявної моторики для активації моторних областей мозку, що є ключовим механізмом у відновленні рухових функцій у пацієнтів із неврологічними порушеннями, зокрема після інсульту. Використання BCI-систем у поєднанні з уявною моторикою продемонструвало потенціал для поліпшення реабілітації нижніх кінцівок шляхом активації нейропластичних механізмів. Зокрема, результати дослідження узгоджуються з попередніми роботами, які вказують на важливість низькочастотних компонентів ЕЕГ у розпізнаванні моторних намірів.

Ці результати підкреслюють значення BCI-технологій для розвитку BCI-систем, здатних адаптуватися до індивідуальних характеристик користувачів. Використання автоматизованих методів вибору частотних діапазонів, таких як Riemannian geometry та спектральний аналіз, може значно покращити точність розпізнавання уявних рухів, що відкриває нові можливості для персоналізованої нейрореабілітації.

Висновки

У ході даного дослідження було проведено ґрунтовний аналіз сучасних підходів до виявлення намірів руху у людей з порушеннями функціональності кінцівок за допомогою інтерфейсів мозок-комп'ютер, що базуються на електроенцефалографічних сигналах. Основна увага була зосереджена на когнітивному процесі моторної уяви, який відіграє ключову роль у системах BCI для осіб з ампутаціями та неврологічними ураженнями.

Результати аналізу свідчать про значний потенціал використання BCI для відновлення рухових функцій у пацієнтів з порушеннями кінцівок. Експериментальні дослідження, розглянуті у межах цієї роботи, підтверджують ефективність технологій MI як у випадках неврологічних захворювань (наприклад, після інсульту чи при хворобі Паркінсона), так і у пацієнтів із периферичними ушкодженнями, включаючи осіб після ампутації.

Особливо перспективними виявилися гібридні BCI-системи, що поєднують ЕЕГ із іншими фізіологічними сигналами, такими як електроміографія. Це дозволяє підвищити точність розпізнавання намірів руху, оптимізувати керування протезами та екзоскелетами, а також покращити користувацький досвід у реабілітаційних програмах.

Експерименти, розглянуті в рамках даного дослідження, демонструють різноманітні підходи до використання моторної уяви. Зокрема, поєднання уявної моторики з активними рухами підвищує ефективність відновлення рухової активності. Дослідження Al-Quraishi M.S. et

ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

al. показало, що пацієнти з травмою спинного мозку здатні використовувати BCI для керування протезованими кінцівками на основі ЕЕГ-сигналів. Експеримент Rea M. et.al. підтвердив можливість прогнозування рухових намірів у пацієнтів після інсульту.

Однак, незважаючи на значний прогрес у галузі, залишаються певні виклики, зокрема низьке відношення сигнал/шум у ЕЕГ, індивідуальні варіації в мозковій активності користувачів та потреба у тривалому навчанні користувачів для ефективного використання BCI. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку адаптивних алгоритмів, що враховують індивідуальні особливості мозкової активності, а також на створення зручніших та менш нав'язливих BCI-систем.

Перспективність дослідження

Подальші дослідження будуть зосереджені на вдосконаленні алгоритмів обробки нейросигналів для підвищення точності та швидкості розпізнавання користувацьких намірів. Також перспективним напрямком є розробка адаптивних BCI-систем, що зможуть підлаштовуватися під індивідуальні особливості пацієнтів. Окрему увагу планується приділити інтеграції BCI з іншими реабілітаційними технологіями, такими як екзоскелети та нейростимуляція, для створення комплексних рішень у відновленні рухових функцій.

Конфлікт інтересів відсутній.

Література

1. Wolpaw JR, Birbaumer N, Heetderks WJ, McFarland DJ, Peckham PH, Schalk G. Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting. IEEE Trans Rehabil Eng. 2000;8(2):164-73. DOI: 10.1109/tre.2000.847807. PMID: 10896178

2. Di Rienzo F, Debarnot U, Daligault S, Saruco E, Delpuech C, Doyon J, et al. Online and offline performance gains following motor imagery practice: a comprehensive review of behavioral and neuroimaging studies. Front Hum Neurosci. 2016;10:315. DOI: 10.3389/fnhum.2016.00315. PMID: 27445755.

3. Raffin E, Giraux P, Reilly KT. The moving phantom: motor execution or motor imagery? Cortex. 2012;48(6):746-57. DOI: 10.1016/j.cortex.2011.02.003. PMID: 21397901.

4. Raffin E, Mattout J, Reilly KT, Giraux P. Disentangling motor execution from motor imagery with the phantom limb. Brain. 2012;135(2):582-95. DOI: 10.1093/brain/awr337. PMID: 22345089.

5. Saruco E, Guillot A, Saimpont A, Di Rienzo F, Durand A, Mercier C, et al. Motor imagery ability of patients with lower-limb amputation: exploring the course of rehabilitation effects. Eur J Phys Rehabil Med. 2019;55(5):634-45. DOI: 10.23736/S1973-9087.17.04776-1. PMID: 29144105.

6. Cunha RG, Da-Silva PJG, Paz CCdSC, Ferreira ACdS, Tierra-Criollo CJ. Influence of functional task-oriented mental practice on the gait of transtibial amputees: a randomized, clinical trial. J Neuroeng Rehabil. 2017;14:28. DOI: 10.1186/s12984-017-0238-x. PMID: 28399873.

7. Moxey PW, Gogalniceanu P, Hinchliffe RJ, Loftus IM, Jones KJ, Thompson MM, et al. Lower extremity amputations – a review of global variability in incidence. Diabet Med. 2011;28(10):1144-53. DOI: 10.1111/j.1464-5491.2011.03279.x. PMID: 21388445.

8. Tucker MR, Olivier J, Pagel A, Bleuler H, Bouri M, Lambercy O, et al. Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: a review. J Neuroeng Rehabil. 2015;12:1. DOI: 10.1186/1743-0003-12-1. PMID: 25557982

ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

9. Al-Quraishi MS, Elamvazuthi I, Daud SA, Parasuraman S, Borboni A. EEG-based control for upper and lower limb exoskeletons and prostheses: a systematic review. Sensors (Basel). 2018;18(10):3342. DOI: 10.3390/s18103342. PMID: 30301238

10. Murphy DP, Bai O, Gorgey AS, Fox J, Lovegreen WT, Burkhardt BW, et al. Electroencephalogram-based brain–computer interface and lower-limb prosthesis control: a case study. Front Neurol. 2017;8:696. DOI: 10.3389/fneur.2017.00696. PMID: 29326653.

11. Rimbert S, Trocellier D, Lotte F. Is event-related desynchronization variability correlated with BCI performance? 2022 IEEE Int Conf Metrol Ext Reality Artif Intell Neural Eng (MetroXRAINE). 2022;163-8. DOI: 10.1109/MetroXRAINE54828.2022.9967551.

12. Rea M, Rana M, Lugato N, Terekhin P, Gizzi L, Brötz D, et al. Lower limb movement preparation in chronic stroke: a pilot study toward an fNIRS-BCI for gait rehabilitation. Neurorehabil Neural Repair. 2014;28(6):564-75. DOI: 10.1177/1545968313520410. PMID: 24482298.

13. Do AH, Wang PT, King CE, Chun SN, Nenadic Z. Brain-computer interface controlled robotic gait orthosis. J Neuroeng Rehabil. 2013;10:111. DOI: 10.1186/1743-0003-10-111. PMID: 24321081.

14. Ferrero L, Quiles V, Ortiz M, Ianez E, Gil-Agudo A, Azorin JM. Brain-computer interface enhanced by virtual reality training for controlling a lower limb exoskeleton. iScience. 2023;26(5):106675. DOI: 10.1016/j.isci.2023.106675. PMID: 37250318.

15. Delisle-Rodriguez D, Cardoso V, Gurve D, Loterio F, Romero-Laiseca MA, Krishnan S, et al. System based on subject-specific bands to recognize pedaling motor imagery: towards a BCI for lower-limb rehabilitation. J Neural Eng. 2019;16(5):056005. DOI: 10.1088/1741-2552/ab08c8. PMID: 30786265.

Solovei S., Barabanov O.

USING MOTOR IMAGERY FOR MOVEMENT INTENTION DETECTION IN INDIVIDUALS WITH LIMB MOTOR FUNCTION IMPAIRMENTS (literature review)

Brain-Computer Interfaces (BCI) represent a promising field in neuroengineering and rehabilitation medicine, particularly for patients with motor function impairments caused by limb amputations or neurological injuries. One of the key approaches in this domain is the use of Motor Imagery (MI) to identify motor intentions, enabling effective control of prostheses and neurotechnological devices. This review analyzes current methods of integrating MI into rehabilitation processes, specifically focusing on its application in restoring motor functions after amputation. Special attention is given to the mechanisms of motor intention detection using ElectroEncephaloGraphy (EEG), particularly Event-Related Desynchronization (ERD) and Event-Related Synchronization (ERS), which are primary features of sensorimotor rhythms during imagined movement. The review considers experimental studies evaluating the effectiveness of MI in rehabilitation and prosthetic control. It examines the use of MI to reduce phantom limb pain, improve somatosensory cortical organization, and control lower limb prostheses, providing a natural sense of movement even in complex conditions. Experimental data also suggest that integrating MI with Virtual Reality (VR) enhances patient motivation and reduces physical strain during rehabilitation. Key challenges discussed include the low signal-to-noise ratio in EEG and individual differences in patients' MI abilities. The analysis confirms that MI technologies can significantly improve the quality of life for individuals with motor function impairments, promoting both physical and cognitive recovery. Prospective research

ISSN print 2414-4517, ISSN online 2710-1487, https://ecm.knmu.edu.ua, ecm.journal@knmu.edu.ua

directions include optimizing motor intention recognition algorithms, enhancing EEG interpretation accuracy, and expanding the potential of MI in controlling complex prosthetic systems.

Keywords: *Brain-Computer Interface, neuroplasticity, post-amputation rehabilitation, movement intention prediction, phantom limb pain.*

Надійшла до редакції 21.02.2025
Прийнята до опублікування: 26.06.2025
Опублікована 30.06.2025

Відомості про авторів

Соловей Сергій Романович – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Україна.
Поштова адреса: Україна, 01033, м. Київ, вул. Володимирська, 64/13, к. 35.
E-mail: maximum.lenovo.ml@gmail.com

Барабанов Олександр Валерійович – науковий керівник, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри напівпровідникової електроніки радіофізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Україна.
Поштова адреса: Україна, 01033, м. Київ, вул. Володимирська, 64/13, к. 35.
E-mail: alex1464b@gmail.com