

Наталія МАНЧЕВА, канд. техн. наук, доц.,
Наталія, ТІТОВА, д-р техн. наук, проф.,
Нікіта ЦУКАНОВ, студент,
Ігор ШАПОВАЛОВ, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
Вадим КИРИЛЕНКО, аспірант
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна, e-mail: vmanichev@ukr.net,

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОФІЗІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ІНТЕРФЕЙС МОЗОК-КОМП'ЮТЕР (BCI)

Анотація. Мета даної роботи спрямована на аналіз можливостей використання нейрочіпів та інтерфейсів мозок-комп'ютерів у хірургії та протезуванні з метою покращення діагностики, лікування та реабілітації пацієнтів.

Ключові слова: нейрочіпи, інтерфейс мозок-комп'ютер (BCI), електрофізіологічні системи, хірургія, протезування.

Нейрочіпи, або Інтерфейс мозок-комп'ютер (Brain-computer interfaces) (BCI) отримують мозкові сигнали, аналізують їх і перетворюють на команди, які передаються на вихідні пристрої, що виконують потрібні дії. Основна ціль BCI – замінити або відновити корисну функцію для людей з інвалідністю внаслідок нервово-м'язових захворювань, таких як бічний аміотрофічний склероз, церебральний параліч, інсульт або травма спинного мозку. BCI також можуть виявитися корисними для реабілітації після інсульту та інших захворювань [1]. У майбутньому вони можуть підвищити продуктивність хірургів та інших медичних працівників. Щоб досягти цього, система BCI складається з 4 послідовних компонентів: отримання сигналу, виділення ознак, трансляція ознак і вихід пристрою. Отримання сигналу – це вимірювання сигналів мозку за допомогою певного датчика (наприклад, шкіри голови або внутрішньочерепних електродів для електрофізіологічної активності, fMRI для метаболічної активності). Сигнали посилюються до рівнів, придатних для електронної обробки [2].

Потім сигнали оцифровуються та передаються на комп'ютер. Виділення ознак – це процес аналізу цифрових сигналів, щоб відрізнити відповідні характеристики сигналу (тобто ознаки сигналу, пов'язані з наміром людини) від стороннього вмісту та представити їх у компактній формі, придатній для перетворення у вихідні команди.

Оскільки значна частина відповідної (тобто найбільш сильно корельованої) активності мозку є тимчасовою або коливальною, найчастіше вилучаються ознаки сигналу в сучасних системах BCI – це амплітуди та затримки відповіді ЕЕГ або ECoG, що запускаються часом, потужність у певних діапазонах частот ЕЕГ або ECoG, або швидкості активації окремих кортикальних нейронів. Отримані ознаки сигналу потім передаються в алгоритм трансляції ознак, який перетворює характеристики у відповідні команди для пристрою виводу [3]. Команди з алгоритму трансляції функцій керують зовнішнім пристроєм, забезпечуючи такі функції, як вибір літер, керування курсором, робота роботизованої руки тощо.

Сучасні електрофізіологічні системи BCI поділяються на 3 основні типи:

1. BCI, які використовують запис ЕЕГ шкіри голови - неінвазивні BCI на основі ЕЕГ є найбільш широко дослідженим підходом завдяки мінімальному ризику та відносній зручності проведення досліджень і набору учасників. Застосування на сьогоднішній день зазвичай обмежені безперервним керуванням рухом із низьким ступенем свободи та дискретним вибором.

2. BCI, які використовують діяльність ECoG. Активність ECoG реєструється з кортикальної поверхні, тому для цього потрібна імплантація субдуральної або епідуральної матриці електродів. ECoG записує сигнали вищої амплітуди, ніж ЕЕГ, і забезпечує чудову просторову роздільну здатність і спектральну смугу. На додаток до низькочастотної (<40 Гц) активності, яка домінує на ЕЕГ, ECoG включає високочастотну (тобто гамма-діапазон >40 Гц) активність до 200 Гц і, можливо, вище. Гамма-активність важлива, оскільки вона демонструє дуже точну функціональну локалізацію; сильно корелює з конкретними аспектами моторики, мови та когнітивних функцій; і пов'язаний із частотою активації окремих нейронів і залежними від рівня кисню в крові сигналами, які виявляються за допомогою фМРТ.

3. ВСІ, які використовують активність, записану в мозку. Невеликі інтракортикальні мікроматриці, такі як імплантовані у випадку тетраплегії, можуть бути вбудовані в кору. Ці інтракортикальні системи мікроматриць можуть записувати потенціали дії окремих нейронів і локальні потенціали поля (по суті, мікро-ЕЕГ), створені відносно обмеженою популяцією найближчих нейронів і синапсів [4]. Недоліками таких імплантів є ступінь інвазивності з необхідністю краніотомії та нейрохірургічної імплантації, обмежена зона запису та досі невирішене питання довгострокової функціональної стабільності реєструючи електродів.

Hochberg та інші продовжують клінічні випробування з використанням 96-електродного мікročіпу, імплантованого в праву прецентральну звивину пацієнтів з тетраплегією (рис. 1.). Ці випробування продемонстрували керування роботизованою рукою, комп'ютерним курсором, світлом і телевізором за допомогою уявних рухів руки. Нещодавно вони продемонстрували, що точне керування курсором все ще можна отримати через 1000 днів після імплантації. Поточні дослідження вивчають використання цієї системи для контролю протезів кінцівок і керованих мозком ФЕС паралізованих м'язів [5].

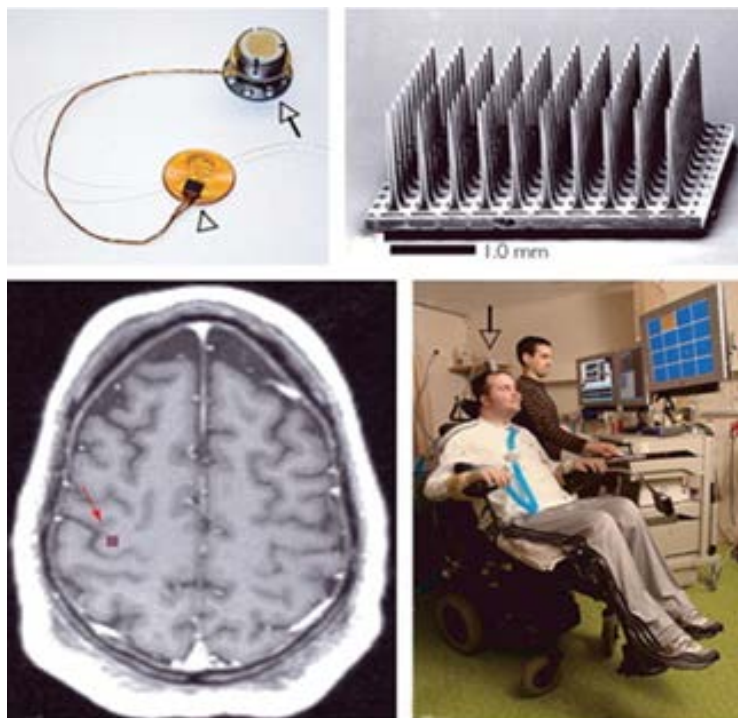


Рис. 1. Інтракортикальна матриця мікроелектродів та її розміщення у пацієнта з тетраплегією

Кеннеді та інші продовжують клінічні випробування системи, яка використовує інтракортикальні мікроелектроди, інкапсульовані в скляних колбочках, у яких нейрити ростуть у колбочках для забезпечення стабільного та надійного довгострокового запису. У 1998 році ця технологія була імплантована пацієнту з синдромом замкнутості після інсульту стовбура мозку. Протягом 4 років дослідження пацієнт навчився керувати комп'ютерним курсором. Сучасні дослідження спрямовані на відновлення мовлення шляхом імплантації пристрою в мовну моторику та декодування фонем із уявної мови.

У нещодавніх дослідженнях 2 пацієнтів із стереотаксичними глибинними електродами, імплантованими в гіпокамп перед операцією з лікування епілепсії, змогли використовувати сигнали від цих електродів для точного керування сканером ВСІ на основі P300 [6].

Дослідження, які тривають у ряді лабораторій, спрямовані на досягнення природного контролю над такими пристроями, як протез руки, за допомогою мікроматриць електродів, імплантованих у моторну кору або інші ділянки кори головного мозку приматів. У кількох центрах розробляються плани перевести ці дослідження на випробування на людях.

А, масив із 100 мікроелектродів на американському пенні. В, Мікроелектродна матриця на скануючій електронній мікрофотографії. С, Передопераційне аксіальне T1-зважене магнітно-резонансне зображення пацієнта. Червоний квадрат у прецентральній звивині показує приблизне

розташування масиву D. Пацієнт сидить в інвалідному візку та працює з техніком над завданням інтерфейсу мозок-комп'ютер. Сіра стрілка вказує на черезшкірну підставку, яка містить підсилювач та інше обладнання для отримання сигналу [4].

Висновки

На даний час вражаючі досягнення досліджень і розробок ВСІ залишаються майже повністю обмеженими лабораторією, і основна частина роботи на сьогоднішній день складається з даних, зібраних від здорових людей або тварин. Дослідження в кінцевій цільовій популяції людей з серйозними вадами в основному обмежувалися кількома роботами (експериментами), які ретельно контролювали дослідницький персонал. Трансляція захоплюючого лабораторного прогресу для клінічного використання, до систем ІМТ, які фактично покращують повсякденне життя людей з обмеженими можливостями, тільки почалася.

Це важливе завдання, мабуть, навіть більш складне, ніж лабораторні дослідження, які виробляють систему ВСІ. Воно повинно показати, що конкретну систему ВСІ можна впровадити у формі, придатній для тривалого незалежного домашнього використання, визначити відповідну популяцію користувачів і встановити, що вони можуть використовувати ВСІ, продемонструвати, що їхнє домашнє середовище може підтримувати використання ними ВСІ та що вони дійсно його використовували, і встановили, що ВСІ покращує їх життя. Ця робота потребує відданих, добре підтриманих, міждисциплінарних дослідницьких груп, які мають досвід у повному спектрі відповідних дисциплін, включаючи інженерію, інформатику, фундаментальну та клінічну нейронауку, допоміжні технології та клінічну реабілітацію.

На сьогоднішній день дослідження та розробки систем Brain-Computer Interface (BCI) переважно базуються на даних, отриманих від здорових людей або тварин, і здійснюються переважно в лабораторних умовах. Лише обмежена кількість досліджень проведена на людях з серйозними вадами. Також на разі існує лише невелика кількість практичних досліджень та екземплярів, але не зважаючи на це, розвиток науки у даному напрямку рухається доволі швидко.

Література

1. Vidal J.J. Toward direct brain-computer communication. *Annu Rev Biophys Bioeng.* 1973. 2: 157–180 p. URL: https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105?url_ver=Z39.88-2003&rft_id=ori%3Arid%3Aacrossref.org&rft_dat=cr_pub++0pubmed.
2. Farwell L.A., Donchin E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1988 p. 70(6). P. 510–523.
3. *Mayo Clin Proc Brain-Computer Interfaces in Medicine* 2012 Mar; 87(3): 268–279 p. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3497935/#bib14>.
4. Чернінський А., Крижановський С., Зима І. Електрофізіологія головного мозку людини: методичні рекомендації до практикуму. Київ: 2011. С. 4–10.
5. Ryan T. Canolty, Maryam Soltani, Sarang S. Dalal, Erik Edwards, Nina F. Dronkers, Srikantan S. Nagarajan, Heidi E. Kirsch, Nicholas M. Barbaro, Robert T. Knight. Spatiotemporal dynamics of word processing in the human brain. *Front Neurosci.* 2007 Nov; 1(1): 185–196 p. Published online 2007 Oct 15. Prepublished online 2007 Sep 1. DOI: 10.3389/neuro.01.1.1.014.2007. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2518055>.
6. Krusienski DJ, Shih JJ Контроль візуальної клавіатури за допомогою електрокортикографічного інтерфейсу мозок-комп'ютер. *Нейрореабілітація нервової системи.* 2011 рік; 25 (4): 323–331 p. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3407379>.