

РОЗРОБКИ ІМПЛАНТОВАНИХ НЕЙРОІНТЕРФЕЙСІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. Розглянуто особливості використання імплантованих нейроінтерфейсів. Проаналізовано основні методи. Розглянуто досягнення закордонних фірм та науковців з України.

Ключові слова: імплантат, нейроінтерфейс, мікроелектродні решітки, біоенергетичними системами живлення імплантів

Розробки імплантованих нейроінтерфейсів [1-3] є одним із важливих напрямів нейротехнологій, які поєднують досягнення нейрофізіології, біоінженерії, мікроелектроніки та штучного інтелекту. Імплантовані нейроінтерфейси, або інвазивні інтерфейси мозок-комп'ютер, забезпечують пряме з'єднання між мозком людини та зовнішніми електронними пристроями з метою зчитування, аналізу або стимуляції мозкової активності. Сучасні розробки у цій сфері спрямовані на мініатюризацію імплантів та підвищення їх біосумісності: використовуються нові матеріали, як-от графен, наноструктуровані полімери та вуглецеві волокна, що зменшують запальні реакції й дозволяють довготривале використання пристроїв без серйозного впливу на тканини мозку. Особливу увагу приділено розробці інтелектуальних алгоритмів для обробки нейросигналів, зокрема методів машинного навчання, які дозволяють точно розпізнавати наміри пацієнта, наприклад, для керування протезами або курсором. З'являються моделі з двостороннім зв'язком, здатні не лише зчитувати активність, а й здійснювати електростимуляцію для відновлення функцій, таких як зір, слух чи контроль м'язів. Удосконалення технологій бездротової передачі даних дозволяє уникнути зовнішніх кабелів, зменшуючи ризик інфекцій і підвищуючи комфорт пацієнта. Окремі проєкти, як-от Neuralink, BrainGate та інші, вже тестують імпланти, здатні функціонувати роками з високою точністю без значного впливу на організм. Практичне застосування таких систем охоплює сфери реабілітації після травм спинного мозку, керування роботизованими протезами думкою, лікування неврологічних захворювань через глибоку мозкову стимуляцію, а також відкриває перспективи комунікації для осіб з повним паралічем. Водночас такі технології потребують суворого етичного контролю та правового регулювання, оскільки вони прямо взаємодіють із центральною нервовою системою людини і можуть впливати не лише на функції, а й на особистість.

Подальші дослідження у сфері імплантованих нейроінтерфейсів зосереджуються на підвищенні щільності каналів запису для одночасного зчитування активності з тисяч нейронів, що дозволяє досягти вищої роздільної здатності в передачі сигналів від мозку до пристрою. Вчені працюють над створенням самонавчальних інтерфейсів, які здатні адаптуватися до нейропластичності мозку, змінюючи схеми декодування сигналів у процесі взаємодії з користувачем. Такий підхід особливо актуальний для пацієнтів з нейродегенеративними розладами, де функціональний стан мозку поступово змінюється. Також ведуться роботи над біоенергетичними системами живлення імплантів, зокрема використання енергії тепла тіла або біохімічних процесів для автономного функціонування без потреби в заміні батарей. Перспективним напрямом є також інтеграція імплантованих нейроінтерфейсів із віртуальною та доповненою реальністю, що дозволяє створити нові форми взаємодії між мозком і цифровим середовищем. У військовій сфері такі інтерфейси розглядаються як засіб підвищення когнітивних можливостей бійців, а в цивільному секторі — як основа для створення нейроасистентів і пристроїв для розширення людських можливостей. У медичній практиці імпланти застосовуються для реабілітації після інсультів, контролю епілептичних нападів, лікування депресії та синдрому хронічного болю. Низка експериментів уже продемонструвала успішне відновлення функції мовлення у паралізованих пацієнтів шляхом перекладу нейросигналів у текст у реальному часі. Проте, поряд із науковими досягненнями постає низка етичних питань: щодо конфіденційності нейроданих, меж використання таких технологій, а також потенційної можливості зовнішнього втручання у свідомість людини. Тому подальший розвиток імплантованих нейроінтерфейсів потребує не лише технічного вдосконалення, а й формування чіткої нормативно-правової бази, міждисциплінарної експертизи та активного суспільного обговорення.

У розробці імплантованих нейроінтерфейсів використовуються різноманітні методи, що охоплюють як біоінженерні, так і алгоритмічні рішення. Основним методом зчитування нейрональної активності є використання мікроелектродних решіток, які імплантуються безпосередньо в кору головного мозку та реєструють електричні потенціали окремих нейронів або груп нейронів. Часто застосовують технології, як-от Utah Array або NeuroPixels, які дозволяють отримувати дані з високою просторовою та часовою роздільною здатністю. Ще один метод полягає у використанні нейронних датчиків, заснованих на наноматеріалах, зокрема графені або вуглецевих нанотрубках, які мають високу провідність і біосумісність. Для забезпечення бездротової передачі даних застосовуються індуктивні або радіочастотні системи зв'язку, що дозволяють уникнути фізичних з'єднань з імплантом і підвищити безпеку пацієнта. У процесі обробки даних широко використовуються методи машинного навчання, зокрема глибокі нейронні мережі, які забезпечують декодування нейросигналів у реальному часі — наприклад, розпізнавання моторних намірів або мовленнєвих патернів. Також застосовуються алгоритми фільтрації шуму, головним чином адаптивні фільтри Калмана та вейвлет-аналіз, що дозволяють виділити значущі сигнали на фоні біоелектричних перешкод. Методи зворотного зв'язку включають глибоку мозкову стимуляцію (DBS), мікроелектростимуляцію кори та інтерфейси зі зворотною чутливістю, які забезпечують користувачеві відчуття тиску або температури при взаємодії з протезами. Для калібрування та навчання нейроінтерфейсів використовуються протоколи зі зворотним зв'язком за принципом нейропластичності, що дозволяє пристрою адаптуватися до конкретного користувача. Сучасні методи також передбачають створення цифрових двійників мозкової активності — віртуальних моделей, які відтворюють індивідуальні особливості нервової системи пацієнта та використовуються для оптимізації взаємодії з імплантом. Усі ці методи у сукупності забезпечують високу ефективність імплантованих нейроінтерфейсів і відкривають нові можливості для нейрореабілітації, когнітивного посилення та інтерфейсів розширеної взаємодії між мозком і машиною.

У світі активно працює низка провідних компаній, які спеціалізуються на розробці імплантованих та неінвазивних нейроінтерфейсів. Однією з найвідоміших є Neuralink, заснована Ілоном Маском. Вона розробляє імплантовані нейроінтерфейси з високою пропускну здатністю для прямої комунікації між мозком і комп'ютером. У 2024 році Neuralink успішно імплантувала пристрої першим пацієнтам, дозволяючи їм керувати цифровими інтерфейсами за допомогою думки. Компанія Synchron, з офісами в США та Австралії, створила нейроінтерфейс Stentrode, який імплантується через кровоносні судини без хірургічного втручання в мозок. Synchron співпрацює з Apple щодо стандартизації керування пристроями через нейросигнали.

Ще одна молода, але перспективна компанія — Precision Neuroscience — розробляє тонкоплівкові електродні матриці, які можна легко ввести та витягти з мозку без ушкодження тканини. Paradromics фокусується на високошвидкісних BCI для пацієнтів із тяжкими формами паралічу, забезпечуючи високу точність та швидкість передачі сигналу. BrainGate, один із найстаріших дослідницьких консорціумів у галузі нейроінтерфейсів, займається тестуванням імплантів у пацієнтів із тетраплегією, забезпечуючи базову можливість взаємодії з комп'ютерами.

У сфері неінвазивних інтерфейсів значних результатів досягли компанії Kernel, NeuroSky, BrainCo та Bitbrain. Kernel створила шолом Kernel Flow для реєстрації мозкової активності на основі ближнього інфрачервоного випромінювання, придатного для досліджень когнітивних процесів. NeuroSky є лідером споживчого EEG-сектору, постачаючи доступні пристрої для освіти, ігор і тренування уваги. BrainCo розробляє системи нейроконтролю для протезів та пристроїв контролю за сном і стресом. Bitbrain, іспанська компанія, об'єднує апаратні та програмні рішення в галузі нейронауки, пропонуючи EEG-системи для наукових та прикладних досліджень. Також варто згадати Starfish Neuroscience, яку заснував генеральний директор компанії Valve Гейб Ньюелл. Її мета — створення бездротових нейроінтерфейсів, які зможуть взаємодіяти з кількома ділянками мозку одночасно, з першими прототипами, запланованими на 2025 рік.

Ці компанії представляють різні підходи до реалізації концепції взаємодії мозку з електронними пристроями: від повністю імплантованих рішень до споживчих неінвазивних технологій. Вони активно впроваджують новітні досягнення в галузі біоелектроніки, мікроелектроніки, машинного навчання та матеріалознавства, відкриваючи нові горизонти як для лікування неврологічних захворювань, так і для розширення можливостей людини у майбутньому.

Українські вчені досягли певних успіхів у сфері розробки імплантованих нейроінтерфейсів, незважаючи на обмежені фінансові та технічні ресурси. Основні дослідження зосереджені на неінвазивних та інвазивних BCI-системах для медичних і реабілітаційних цілей, а

також на розробці алгоритмів аналізу електроенцефалографічних сигналів, які можуть застосовуватися як етап підготовки до глибших імплантаційних рішень.

Дослідницькі групи у провідних технічних університетах, зокрема у Національному технічному університеті України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Харківському національному університеті радіоелектроніки, Львівській політехніці та Вінницькому національному технічному університеті, займаються створенням прототипів нейроінтерфейсів на основі електроенцефалографії, які використовують для відновлення моторних функцій або керування технічними пристроями. Зокрема, у ВНТУ було проведено дослідження з розробки систем ВСІ для дистанційного керування роботизованими системами через інтерпретацію ЕЕГ-сигналів, що відкриває можливість використання таких технологій в інвалідних візках, екзоскелетах або розумних будинках.

На кафедрі біомедичної інженерії НТУУ "КПІ" ведуться роботи над удосконаленням електродних систем та обробкою сигналів мозку із застосуванням нейронних мереж. Крім того, українські дослідники активно публікуються у міжнародних журналах, беруть участь у грантових проєктах та співпрацюють із зарубіжними партнерами в рамках Horizon Europe, COST Action та інших програм ЄС.

Важливою сферою є і розробка біосумісних матеріалів — вчені з Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України досліджують можливості створення електродів із покращеними властивостями, зокрема вуглецевих та керамічних структур, які можуть бути використані в імплантованих пристроях.

У 2020–2024 роках з'явилися перші публікації українських дослідників про математичне моделювання адаптації імплантів у мозковій тканині, а також моделі впливу мікрострумів на функціонування нейронних ланцюгів. Хоча поки що Україна не має повноцінно функціональних імплантованих ВСІ, здатних працювати на рівні проєктів як Neuralink або BrainGate, існує активна наукова база та експериментальні прототипи, що демонструють високий потенціал.

Українські вчені сьогодні закладають фундамент для подальшого розвитку імплантованих нейроінтерфейсів шляхом створення апаратних і програмних засобів, алгоритмів обробки нейросигналів, моделей стимуляції та інтерпретації мозкової активності, орієнтуючись на глобальні наукові стандарти та технологічні виклики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. C. Kemere, K. Shenoy, and T. Meng, "Model-Based Neural Decoding of Reaching Movements: A Maximum Likelihood Approach," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, no. 6, pp. 925–932, Jun. 2004.
2. H. Miranda, V. Gilja, C. Chestek, K. Shenoy, and T. Meng, "HermesD: A High-rate Long-range Wireless Transmission System for Simultaneous Multichannel Neural Recording Applications," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 181–191, Jun. 2010.
3. R. Chavarriaga, S. Soman, Z. McKinney, J. L. Contreras-Vidal, and S. F. Bush, "Overview of the IEEE Standards Roadmap on Neurotechnologies for Brain-Machine Interfacing," *IEEE Brain Newsletter*, May 2020

Романюк Олександр Никифорович, доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, rom8591@gmail.com

Павлов Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, psv@vntu.edu.ua

Development of implanted neurointerfaces

Abstract. The features of the use of implanted neurointerfaces are considered. The main methods are analyzed. The achievements of foreign companies and scientists from Ukraine are considered.

Keywords: implant, neurointerface, microelectrode arrays, bioenergetic implant power supply systems

Romanyuk Oleksandr Nikiforovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, rom8591@gmail.com

Pavlov Serhiy Volodymyrovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, psv@vntu.edu.ua