

БІОНІЧНІ ПРОТЕЗИ З НЕЙРОІНТЕРФЕЙСОМ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі узагальнено сучасний стан розробок біонічних протезів із нейроінтерфейсами, систем їх керування та зворотного сенсорного зв'язку. Розглянуті основні технологічні підходи (біоелектричне керування, TMR, RPNI, інвазивні нервові й мозкові інтерфейси, остеоінтеграція) та їхні сильні й слабкі сторони. Наведено перспективи розвитку (замкнені контури зворотного зв'язку, застосування штучного інтелекту для декодування намірів, бездротові імпланти).

Ключові слова: біонічний протез, нейроінтерфейс, TMR, RPNI, сенсорний зворотний зв'язок, остеоінтеграція

Вступ

Розвиток біонічних протезів із нейроінтерфейсами відкриває принципово нові можливості для людей, які втратили кінцівки. Такі системи допомагають відновлювати не лише рухові, а й сенсорні функції. Сьогодні для цього використовують міоелектричні сигнали, сучасні хірургічні методи (Targeted Muscle Reinnervation – TMR, Regenerative Peripheral Nerve Interface – RPNI), а також інвазивні нейроінтерфейси. Завдяки цим підходам управління протезами стає значно більш природним і зрозумілим для користувача [1-3].

Наразі дослідження зосереджені на тому, щоб додати до протезів системи зворотного зв'язку. Це дозволяє людині відчувати дотик або силу стискання предметів. Ще один перспективний напрямок – застосування остеоінтеграції, прямого структурно-функціонального поєднання живої кісткової тканини з поверхнею імплантату, найчастіше металевого. Вона забезпечує надійне кріплення протеза безпосередньо до кістки та створює можливості для прокладання каналів під нейроінтерфейси.

Сучасний стан технології

Нейроімпланти – це мініатюрні пристрої (електроди, зонди), які забезпечують зв'язок з комп'ютерними системами. Вони використовуються для створення нейрокомп'ютерних інтерфейсів, що дозволяє контролювати зовнішні пристрої, а також для відновлення втрачених функцій, наприклад таких як рух. Це технологія, яка допомагає людям з травмами і також використовується при реабілітації.

Міоелектричне керування – найпоширеніший варіант у сучасних протезах. Система зчитує електричні сигнали з м'язів і перетворює їх у рухи штучної кінцівки.

Targeted Muscle Reinnervation (TMR) – хірургічна методика, що дає змогу отримувати чіткіші сигнали від м'язів та водночас зменшує прояви фантомного болю.

Regenerative Peripheral Nerve Interface (RPNI) – технологія, яка створює надійний зв'язок між нервами та м'язами, що забезпечує більш точне управління рухами.

Інвазивні інтерфейси – системи, які підключаються безпосередньо до нервових стовбурів або навіть кори головного мозку, відкриваючи шлях до максимально точного контролю протеза.

Остеоінтеграція – метод кріплення протеза до кістки, що не лише робить його комфортнішим, а також дозволяє інтегрувати електроди та інші елементи управління прямо у конструкцію.

Перспективи

Подальший розвиток біонічних протезів пов'язаний із впровадженням систем штучного інтелекту для декодування рухових намірів, створенням бездротових імплантів, а також розробкою повністю замкнених систем зі зворотним сенсорним зв'язком. Важливим викликом залишаються біосумісність імплантів, довгострокова стабільність сигналу та етичні аспекти застосування таких технологій.

Механонейральні інтерфейси (Mechanoneural interfaces) досить часто застосовуються як комбінована стратегія.

Механонейральні інтерфейси – це перспективна стратегія, яка поєднує фізичні конструкції (м'які тканини, нерви) з електронікою та біоматеріалами для оптимального передавання як моторних, так і

сенсорних сигналів. Ідея полягає в тому, щоб створити з'єднання між нервовими тканинами та протезом, у яких тканини-містки служать середовищем для передавання сигналів без прямих металевих електродів або ж з мінімальними травматичними втручанням.

Висновки

Біонічні протези з нейроінтерфейсами є одним із найперспективніших напрямків сучасної медичної інженерії. Завдячуючи розвитку технологій TMR, RPNI, остеointegraції та інвазивних нейроінтерфейсів стає можливим керування рухами й відновлення сенсорних відчуттів. Поєднання цих підходів із систем штучного інтелекту відкриває шлях до створення повністю інтегрованих «розумних» протезів, які майже не відрізнятимуться від природних кінцівок за функціональністю. Подальші дослідження спрямовані на підвищення біосумісності імплантів, стабільності нейронних сигналів і вирішення етичних питань застосування таких технологій у медицині дозволять вирішувати ці складні завдання на більш якісному рівні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ava G Chappell, Matthew D Ramsey, Seong Park, Gregory A Dumanian, Jason H Ko. Targeted Muscle Reinnervation-an Up-to-Date Review: Evidence, Indications, and Technique. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12081100/>.
2. Pedro Garcia Batista, André Costa Vieira, Pedro Dinis Gaspar. Robotic Prostheses and Neuromuscular Interfaces: A Review of Design and Technological Trends. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/13/9/804>.
3. Melanie J. Wang, Theodore A. Kung, Alison K. Snyder-Warwick, Paul S. Cederna. Merging Neuroscience and Engineering Through Regenerative Peripheral Nerve Interfaces. URL: <https://www.mdpi.com/2673-1592/7/4/97>.

Корчевська Вікторія Андріївна - студентка групи БМІ-236, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: korchevskaviktoria388@gmail.com

Тимчик Сергій Васильович - к-т техн. наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Korchevska Viktoria A. - student of group BMI-23b, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, korchevskaviktoria388@gmail.com

Tymchyk Serhiy V. - PhD (Biomedical Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

BIONIC PROSTHESES WITH NEUROINTERFACE: CURRENT STATUS AND PROSPECTS

Abstract

The paper summarizes the current state of development of bionic prostheses with neural interfaces, control systems and sensory feedback. The main technological approaches (myoelectric control, TMR, RPNI, invasive neural and brain interfaces, AL-based intention decoding, wireless implants).

Keywords: bionic prosthesis, neural interface, TMR, RPNI, sensory feedback, osseointegration.