

КОНЦЕПЦІЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОЇ СТИМУЛЯЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ФАНТОМНОГО БОЛЮ В АМПУТОВАНИХ КІНЦІВКАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді розглянуто проблему фантомного болю в ампутованих кінцівках та перспективи його зменшення за допомогою комбінованої адаптивної стимуляції. Запропонований підхід базується на поєднанні електричної, механічної, термічної та оптичної стимуляції для формування багатоканального сенсорного впливу на нервову систему пацієнта. Описано механізми дії різних видів стимуляції, принципи адаптивного керування на основі біологічного зворотного зв'язку та можливості інтеграції системи у протези або реабілітаційні бандажі. Проаналізовано переваги, обмеження та перспективи використання мультимодальних нейроінженерних систем для реабілітації пацієнтів після ампутації та зменшення проявів фантомного болю.

Ключові слова: фантомний біль, ампутація кінцівок, адаптивна стимуляція, нейромодуляція, мультимодальна стимуляція, біологічний зворотний зв'язок, реабілітація пацієнтів.

Abstract

The report examines the problem of phantom limb pain and the prospects for its reduction using combined adaptive stimulation. The proposed approach is based on the integration of electrical, mechanical, thermal, and optical stimulation to create a multimodal sensory effect on the patient's nervous system. The mechanisms of different stimulation methods, principles of adaptive control based on biological feedback, and possibilities for integrating the system into prosthetic sockets or rehabilitation bandages are described. The advantages, limitations, and prospects of multimodal neuroengineering systems for the rehabilitation of amputee patients and the reduction of phantom pain manifestations are analyzed.

Keywords: phantom pain, limb amputation, adaptive stimulation, neuromodulation, multimodal stimulation, biofeedback, patient rehabilitation.

Вступ

Фантомний біль (ФБ) є поширеним ускладненням після ампутації та може суттєво обмежувати фізичну активність, впливати на сон, викликати хронічний стрес і депресивні стани. Дослідження методів та засобів зменшення фантомного болю в ампутованих кінцівках мають важливе медичне й соціальне значення, оскільки сприяють покращенню якості життя пацієнтів з ампутаціями, їхньої психологічної адаптації та ефективності реабілітації, що призводить до покращення і пришвидшення функціонального відновлення пацієнтів після ампутації.

Фантомний біль у кінцівках – це складна нейропластична проблема, яка виникає, коли мозок інтерпретує відсутність сигналів від ампутованої кінцівки як біль. Слід зауважити, що ФБ пов'язаний не лише з відсутністю сигналів, а й з центральною сенситизацією, корковою перебудовою, патологічною активністю невром та дисбалансом між моторними й сенсорними очікуваннями мозку [1]. Оскільки в цих процесах задіяні й периферичні нерви (невроми кукси), і спинний мозок, і соматосенсорна кора, однофакторна стимуляція (моностимуляція) часто виявляється неефективною [1, 2]. Для формування нових сенсорних каналів, які знімають больові відчуття, ми пропонуємо комбінований підхід до стимуляції.

Види стимуляції

Підхід до комплексної стимуляції передбачає активацію різних типів аферентних (чутливих) нервових волокон з метою формування у мозку різнопланової картини сенсорного представлення ампутованої кінцівки [2]. Для цього можуть бути використані такі види стимуляції: електрична, механічна, теплова, оптична. Розглянемо їх детальніше.

Черезшкірна електронейростимуляція [3, 4] використовується відповідно до класичної сенсорної теорії воротного контролю. При цьому слабкий височастотний струм активує товсті мієлінізовані А β -волокна, які включені в сенсорні канали дотику. Їхні сигнали випереджають повільні тонкі С-волокна, які включені в больові канали, таким чином модулюючи і перекриваючи больові відчуття. Електростимуляція реалізується шляхом накладання металевих електродів на неушкоджені зони нервових стовбурів вище місця ампутації.

Механічна стимуляція включає в себе в першу чергу вібраційні впливи, а також безпосередні дотики або поколювання. Вібрація активує механорецептори у шкірі (тільца Пачіні та Мейснера), що створює сильний потік пропріоцептивної інформації, завдяки чому мозок отримує спектр сигналів від кукси, що впливає на сприйняття її у просторі та знижує центральну дезорієнтацію [5], яка часто є тригером ФБ. Для механічної стимуляції можна використовувати мікрометри (LRA або ERM), які дозволяють створити легкий текстурований шум або патерни поколювання на шкірі кукси.

Термостимуляція теплом або холодом задіє терморецептори і систему теплового аналізатора в мозку. Багато пацієнтів описують фантомний біль як жар або обмороження. Активація теплочутливих шляхів, які включають холодіві А δ -волокна та теплочутливі С-термоволокна, через елементи Пельтьє змінює температурну карту кукси [6], руйнуючи стійкий больовий патерн у корі головного мозку. Термостимуляція реалізується шляхом динамічної зміни температури електродів в діапазоні 25–40 °С, що виключає ризик опіків.

Оптична стимуляція, або фотобіомодуляція передбачає використання світлового подразнення у ближньому інфрачервоному (850 нм) та червоному (660 нм) діапазоні. Оптичне випромінювання проникає глибоко в тканини, що покращує мікроциркуляцію, знижує локальне запалення в невромах (кінчиках пошкоджених нервів), зменшуючи периферичні джерела больових відчуттів [7]. Реалізується шляхом встановлення матриці надяскравих світлодіодів, інтегрована в ложемент кукси.

Комбінований підхід до стимуляції

Основний недолік будь-якої стимуляції – поступове звикання (нейральна адаптація) до вхідного сигналу [8]. Тривалий однотипний вплив призводить до ігнорування мозком такого стимулу. Таким чином, адаптивна система стимуляції повинна працювати не в постійному режимі, а за принципом стохастичного резонансу та просторово-часового кодування.

Адаптивна комбінована стимуляція забезпечується через використання просторової динаміки сигналу, коли стимул не є локалізованим, а переміщується по куксі (наприклад, термостимуляція зліва, вібрація справа, а потім вони міняються місцями), часової динаміки, коли імпульси стимуляції подаються пакетами з випадковим інтервалом (псевдовипадкова модуляція частоти), а також крос-модальної відповіді, коли один тип стимулу (наприклад, механічний імпульс) супроводжується синхронним стимулом іншої природи (наприклад, тепловим впливом для імітації природного дотику до теплового предмета).

Зворотний зв'язок і адаптивність

Щоб система була адаптивною, вона збирати і опрацьовувати дані про поточний стан пацієнта. Зворотний зв'язок може бути реалізований на трьох рівнях:

1) біоелектричний рівень – забезпечується поверхневою електроміографією, забезпечує фіксацію м'язових скорочень кукси. Коли пацієнт відчуває гострий ФБ, часто виникає мимовільний гіпертонус або спазм м'язів. Реєстрація сплеску на ЕМГ є сигналом для системи посилити або змінити режим стимуляції;

2) вегетативний рівень, що оцінює функціональний стан тканин та організму в цілому. Методи фотоплетизмографії та оцінка варіабельності серцевого ритму дозволяють оцінити рівень стресу. Шкірно-гальванічна реакція дозволяє виявляти стан больового шоку через активацію симпатичної нервової системи;

3) суб'єктивний рівень, який реалізується через інтерфейс пацієнта, наприклад, кнопка швидкого логування болю (через BLE-застосунок на смартфоні або фізичний енкодер на протезі/бандажі). Пацієнт самостійно реагує на загострення болю і запускає алгоритм корекції механізму стимуляції.

Використання системи

Сфера застосування комбінованої адаптивної системи стимуляції для зменшення ФБ в ампутованих кінцівках включає як незалежну конструктивну реалізацію, так й інтеграцію в культепріймальні гільзи протезів, що забезпечуватиме постійне пригнічення болю під час ходьби чи виконання повсякденних завдань.

Система також може використовуватись в ранньому післяопераційному періоді реабілітації (після загоєння швів) для запобігання хронізації болю.

Передбачається також реалізація системи в нічному терапевтичному бинді – спеціальному м'якому рукаві або панчосі для кукси, які пацієнт одягає перед сном (адже фантомний біль часто активізується вночі).

Водночас аналіз використання інтегрованих систем виявив певні функціональні обмеження, зокрема:

- необхідно враховувати стан шкірних покривів кукси: за наявності відкритих ран, трофічних виразок чи свіжих рубців електрична, механічна та термостимуляція суворо заборонені (допускається лише безконтактна або обмежена оптична стимуляція);
- можливість когнітивного навантаження та сенсорного перевантаження: якщо всі канали стимуляції діятимуть одночасно з високою інтенсивністю, у мозку може розвинути втом, що може викликати головний біль, роздратування або дзеркальний ефект – посилення больового синдрому;
- енергоспоживання: елементи Пельтьє та генератори для електростимуляції потребують енергії та певного рівня струму, що обмежує час роботи системи від одного заряду акумулятора при автономному використанні в протезі;
- індивідуальний поріг чутливості: нервова провідність у різних пацієнтів може відрізнятись (особливо у пацієнтів з цукровим діабетом чи атеросклерозом), що вимагає попереднього калібрування системи перед використанням.

Висновок

У роботі розглянуто перспективний підхід до зменшення фантомного болю в ампутованих кінцівках шляхом використання комбінованої адаптивної стимуляції, що поєднує електричний, механічний, термічний та оптичний впливи. На відміну від моностимуляції, мультимодальний підхід дозволяє активувати різні типи сенсорних каналів і формувати більш природне сенсорне представлення ампутованої кінцівки, що потенційно сприяє зменшенню нейропластичних порушень, пов'язаних із фантомним болем. Запропонована система передбачає адаптивне керування параметрами стимуляції на основі біоелектричного, вегетативного та суб'єктивного зворотного зв'язку, що забезпечує персоналізацію терапії та підвищення її ефективності. Водночас практична реалізація системи потребує врахування індивідуальних особливостей пацієнтів, енергоспоживання, стану тканин кукси та ризику сенсорного перевантаження. Отримані результати свідчать про доцільність подальших досліджень у напрямку створення інтелектуальних нейроінженерних систем для реабілітації пацієнтів після ампутації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гомолінський В. О., Штофель Д. Х. Адаптивна стимуляція як метод зменшення фантомного болю в ампутованих кінцівках. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2025. № 2 (50). С. 190–199.
2. Riss G., Preatoni G., Valle G., Marazzi M., Bracher N. M., Raspopovic S. *Multisensory stimulation decreases phantom limb distortions and is optimally integrated*. iScience. 2022. Vol. 25 (4). Art. no. 104129.
3. Faghani Jadidi A., Jensen W., Zarei A. A., Lontis E. R. Alteration in Cortical Activity and Perceived Sensation Following Modulated TENS. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2023. № 31. P. 875–883.
4. Patel P., Green M., Tram J., Wang E., Murphy M., Abd-Elsayed A., Chakravarthy K. Latest Advancements in Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation (TENS) and Electronic Muscle Stimulation (EMS): Revisiting an Established Therapy with New Possibilities. *Journal of Pain Research*. 2025. Vol. 18. P. 137–153.

5. Roehrich K., Goldberg M., Fiedler G. Robotic-Enhanced Prosthetic Liners for Vibration Therapy: Reducing Phantom Limb Pain in Transfemoral Amputees. *Sensors*. 2024. Vol. 24 (15). Art. no. 5026.
6. Shokur S., Micera S. Thermal phantom sensations in arm amputees and what it means for future prosthetics. *Temperature*, 2024. Vol. 11 (1). P. 107–109.
7. Wang J. Y., Huang Z. Q., Deng H. P., et al. Low level light therapy/photobiomodulation for diabetic peripheral neuropathy: protocol of a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*, 2022. Vol. 12 (9). Art. no. e059476.
8. Гомолінський В. О., Штофель Д. Х., Васильків В. С. Система адаптивної стимуляції для лікування фантомного болю в ампутованих кінцівках. *Міжнародна науково-практична інтернет-конференція студентів аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН–2025)»*. м. Вінниця, 15–16 червня 2025 р. 3 с. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/25729>

Штофель Дмитро Хуанович – к. т. н., доцент, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email:

Гомолінський Віктор Олексійович – аспірант гр 163-23а, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: vog9645@vntu.edu.ua

Shtofel Dmytro Kh. – Cand. Tech. Sci., Associate Professor, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. email: shtofel@vntu.edu.ua

Homolinskyi Viktor O. – postgraduate student of gr 163-23a, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. email: vog9645@vntu.edu.ua