

СИСТЕМА АДАПТИВНОЇ СТИМУЛЯЦІЇ ДЛЯ ЛІКУВАННЯ ФАНТОМНОГО БОЛЮ В АМПУТОВАНИХ КІНЦІВКАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглядається проблема зменшення фантомного болю у людей з ампутованими кінцівками за допомогою методу електростимуляції. Запропоновано концепцію адаптивної системи електромагнітної стимуляції, яка інтегрує біологічний зворотний зв'язок та технології візуалізації (AR/VR). Описано складові та принципи функціонування ключових компонентів системи: модулі збору даних для біологічного зворотного зв'язку, адаптивного ШІ-ядра для оптимізації параметрів стимуляції, модуля електромагнітної стимуляції та модуля візуалізації за технологією AR/VR для підвищення ефективності терапії фантомного болю.

Ключові слова: фантомний біль, електротерапія, адаптивна стимуляція, електромагнітна стимуляція, біологічний зворотний зв'язок, віртуальна реальність, доповнена реальність.

Abstract

The paper considers the problem of reducing phantom pain in people with amputated limbs using the method of electrical stimulation. The concept of an adaptive electromagnetic stimulation system that integrates biofeedback and visualization technologies (AR/VR) is proposed. The components and principles of operation of the key components of the system are described: data collection modules for biofeedback, an adaptive AI core for optimizing stimulation parameters, an electromagnetic stimulation module, and a visualization module using AR/VR technology to improve the effectiveness of phantom pain therapy.

Keywords: phantom pain, electrotherapy, adaptive stimulation, electromagnetic stimulation, biofeedback, virtual reality, augmented reality.

Вступ

Фантомний біль є поширеним і виснажливим станом, що вражає значну частину людей після ампутації кінцівки. Він суттєво знижує якість життя, призводить до функціональних обмежень та психологічного дискомфорту. Історично, методи лікування фантомного болю варіювалися від фармакологічних до хірургічних втручань та нейромоделювання. Проте, багато з них мають обмежену ефективність, значні побічні ефекти або є інвазивними [1].

Сучасні дослідження в галузі нейронаук вказують на роль малоадаптивної нейропластичності у виникненні та підтримці фантомного болю. Це відкриває можливості для розробки нових підходів, спрямованих на "перенавчання" мозку [2]. Розвиток технологій штучного інтелекту, біометричного моніторингу та імерсивних середовищ (AR/VR) створює передумови для створення систем, здатних динамічно адаптувати терапевтичний вплив, підвищуючи його точність та індивідуалізацію.

Принцип функціонування системи адаптивної стимуляції

Пропонована система є багатокомпонентним рішенням, що об'єднує збір фізіологічних даних, їх аналіз за допомогою штучного інтелекту, адаптивну електромагнітну стимуляцію та імерсивний зворотний зв'язок.

Основні компоненти та їхня взаємодія:

1. **Модуль збору біологічного зворотного зв'язку (БЗЗ).** Модуль включає датчики для моніторингу ключових фізіологічних параметрів пацієнта, таких як:

- електроенцефалограма (ЕЕГ) – для оцінки активності мозку, зокрема змін у альфа-ритмі, що можуть корелювати з больовими станами;
- шкірно-гальванічна реакція (ШГР) – для вимірювання електропровідності шкіри, що є показником стресу та стану вегетативної нервової системи;
- електроміограма (ЕМГ) – для фіксації м'язової активності та напруги, особливо в ділянці кукси,

що може вказувати на фантомні спазми.

2. Зібрані дані передаються для подальшої обробки на **ШІ-ядро адаптації**. Цей елемент є центральним компонентом системи, що відповідає за аналіз отриманих даних БЗЗ та суб'єктивних повідомлень пацієнта про інтенсивність болю. ШІ-ядро використовує алгоритми машинного навчання [3–6] з метою:

- розпізнавання патернів фізіологічної відповіді на біль;
- визначення оптимальних параметрів електромагнітної стимуляції (частота, інтенсивність, тривалість);
- динамічного коригування цих параметрів у реальному часі для максимізації анальгетичного ефекту та мінімізації побічних реакцій.

3. **Модуль електромагнітної стимуляції (ЕМС)**. Модуль може бути реалізований як неінвазивний пристрій для міостимуляції (в окремих випадках можна додатково використати транскраніальну магнітну стимуляцію), який отримує команди від ШІ-ядра. Модуль ЕМС генерує електричні сигнали, які подаються на електроди, встановлені на куксі, чим забезпечується імітація нейром'язової активності ампутованої кінцівки.

4. **Модуль візуалізації та доповненої/віртуальної реальності (AR/VR)**. Модуль забезпечує пацієнтові імерсивний візуальний та, як додаткову опцію, тактильний зворотний зв'язок. Пацієнт може "бачити" та "керувати" віртуальною кінцівкою, що відповідає ампутованій. AR/VR середовище може адаптуватися до фізіологічного стану пацієнта (наприклад, зміна кольору або форми віртуальної кінцівки залежно від рівня болю або успішності стимуляції). Це посилює відчуття "тілесної приналежності" та сприяє корекції кортикальної реорганізації, прийняття пацієнтом свого стану і зменшує інтенсивність та частоту виникнення фантомних больових відчуттів.

Висновки

Розроблена структурна організація системи адаптивної електромагнітної стимуляції пацієнтів з ампутаціями забезпечує самонавчання та динамічну адаптацію до стану пацієнта. Очікується, що час спрацювання та ефективність терапії залежать від комплексного аналізу вхідних сигналів (БЗЗ та суб'єктивних даних) та їх розподілу. Завдяки інтеграції різноманітних функцій активації (аналогічно до порогових, чисто лінійних та лінійних з насиченням функцій формального нейрона), а також застосуванню мультимодального підходу (ЕМС у поєднанні з БЗЗ та AR/VR), система значно розширює свої функціональні можливості для полегшення або елімінації фантомного болю. Це відкриває нові потенційні перспективи для персоналізованої та ефективної нейрореабілітації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bokkon I., Till A., Grass F., Erdöfi Szabó, A. Phantom pain reduction by low-frequency and low-intensity electromagnetic fields. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2011. Vol. 30 (3). P. 115–127. <https://doi.org/10.3109/15368378.2011.596246>
2. Osborn L. E., Ding K., Hays M. A., et al. Sensory stimulation enhances phantom limb perception and movement decoding. *Journal of neural engineering*. 2020. Vol. 17 (5). Art. 056006. <http://doi.org/10.1088/1741-2552/abb861>
3. Ham F. M., Kostanic I. Principles of neurocomputing for science and engineering. McGraw-Hill Higher Education. 2000. 680 p.
4. Tripathi B. K. High dimensional neurocomputing. Growth, Appraisal and Applications. *Studies in Computational Intelligence (SCI series, volume 571)*. Springer, 2015. 170 p.
5. Bhoi, Akash Kumar, et al. (ed.). Bio-inspired neurocomputing. *Studies in Computational Intelligence (SCI series, volume 903)*. Berlin/Heidelberg, Germany : Springer, 2021. 430 p.
6. Gurney K. An introduction to neural networks. CRC press, 2018. 234 p.

Гомолінський Віктор Олексійович – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, email: vog9645@vntu.edu.ua

Штофель Дмитро Хуанович – к. т. н., доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, email: shtofel@vntu.edu.ua

Васильків Владислав Сергійович – студент гр. КОІС-22б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, email: vasilkivalena@gmail.com

Homolinskyi Viktor O. – postgraduate student, Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, email: vog9645@vntu.edu.ua

Shtofel Dmytro Kh. – Cand. Sc. (Eng), Associate Professor at the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, email: shtofel@vntu.edu.ua

Vasylykiv Vladyslav S. – undergraduate student of group KOIS-22b, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, email: vasilkivalena@gmail.com