

АЛГОРИТМІЗАЦІЯ АДАПТИВНОЇ СТИМУЛЯЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ФАНТОМНОГО БОЛЮ В АМПУТОВАНИХ КІНЦІВКАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проаналізовані сучасні підходи до побудови алгоритмів адаптивної електростимуляції з метою усунення фантомного болю у пацієнтів з ампутованими кінцівками. Сформульовано основні вимоги до таких алгоритмів.

Ключові слова: алгоритм, стимуляція, фантомний біль, ампутації, адаптивність.

Abstract

The paper analyzes modern approaches to building adaptive electrical stimulation algorithms to eliminate phantom pain in patients with amputated limbs. The main requirements for such algorithms are formulated.

Keywords: algorithm, stimulation, phantom pain, amputations, adaptability.

Вступ

Фантомний біль (ФБ) залишається одним із найбільш складних та резистентних до лікування станів у сучасній алгології та реабілітаційній медицині. Феномен, вперше детально описаний французьким хірургом Амбруазом Паре ще у 1551 році, який спостерігав, що пацієнти скаржаться на біль у відсутній кінцівці довгостроково після ампутації, досі залишається викликом для клініцистів. Паре прозорливо припустив, що механізм болю може мати як периферичну природу (скорочення нервів), так і центральну, що випередило наукову думку на кілька століть. Сьогодні відомо, що ФБ вражає від 50 % до 80 % пацієнтів з ампутаціями, суттєво знижуючи якість життя та функціональну незалежність [1].

Традиційні підходи, що включають фармакотерапію (анальгетики, антиконвульсанти, опіоїди) та хірургічні втручання (ревізія кукси, симпатектомія), часто демонструють обмежену ефективність або значні побічні ефекти. Це зумовило зміщення фокусу наукових досліджень у бік нейромодуляції. Проте ранні спроби застосування електростимуляції, такі як трансшкірна електрична нервова стимуляція (TENS) або стимуляція спинного мозку (SCS), переважно базувалися на відкритих (open-loop) системах. У таких системах параметри стимуляції встановлювалися лікарем і залишалися незмінними незалежно від динамічного стану пацієнта або його активності. Це призводило до швидкого розвитку толерантності нервової тканини та зниження терапевтичного ефекту з часом [2].

Сучасний етап розвитку нейроінженерії характеризується переходом до адаптивних алгоритмів, здатних модулювати параметри стимуляції в реальному часі. На сьогодні ефективне лікування ФБ передбачає не просто пригнічення передачі больового сигналу, а активної реінтеграції сенсомоторних контурів [3]. Використання периферичної нервової стимуляції та глибокої стимуляції мозку у замкненому контурі дозволяє створювати «штучні» сенсорні відчуття, які заміщують втрачений аферентний вхід, тим самим впливаючи на фундаментальні механізми нейропластичності.

Результати дослідження

Розуміння нейробіологічних механізмів виникнення фантомного болю є критичним для розробки архітектури стимуляційних алгоритмів. Аналіз літератури дозволяє виділити ключові теорії, які безпосередньо впливають на логіку кодування сигналів:

- 1) маладаптивна кортикальна реорганізація та сенсорний дефіцит [4];
- 2) гіпотеза стохастичного заплутовування [5].

Перспективним напрямком у лікуванні ФБ є створення біоміметичних систем периферичної та спінальної стимуляції, які намагаються відтворити поведінку нервової системи.

Дослідження показали, що хоча лінійна частотна модуляція при стимуляції є більш природною з фізіологічної точки зору, вона викликає швидку адаптацію, коли пацієнт перестає відчувати стимул під час тривалих впливів. Лінійна амплітудна модуляція, навпаки, забезпечує більш надійний канал зворотного зв'язку для протезування, дозволяючи пацієнтам точніше дозувати м'язові скорочення [6]. Це вказує на те, що «чиста» біоміметичність не завжди є оптимальною для інженерних рішень, тоді як гібридні підходи можуть бути більш ефективними.

Додаткові дослідження на кішках, де реєстрували активність у гангліях задніх корінців при різних патернах стимуляції, підтвердили, що модуляція частоти на основі згладжених значень пост-стимульних гістограм може покращити природність відчуттів, але вимагає ретельного налаштування для уникнення адаптації [7].

Розробка алгоритмів адаптивної електростимуляції для лікування фантомного болю пройшла шлях від простих генераторів імпульсів до складних кіберфізичних систем. Накопичені наукові дані переконливо свідчать, що ключем до ефективності є не сама електрична енергія, а інформаційний зміст сигналу. Відновлення сенсорного зворотного зв'язку через біоміметичні патерни в замкненій системі (closed-loop) дозволяє реверсувати маладаптивну пластичність та протидіяти стохастичному заплутуванню нейронних мереж. Використання центральних біомаркерів дозволяє точно дозувати терапію в часі, запобігаючи толерантності [8].

Таким чином, узагальнений протокол для сучасного алгоритму протибольової стимуляції можна звести до таких вимог.

1. Мультимодальний вхід. Передбачає комплексне використання даних про механічну взаємодію (сенсори протеза), моторні наміри та м'язові скорочення (електроміографія) та внутрішній стан мозку (електроенцефалографія) та ін.

2. Адаптивне кодування. Використання лінійної амплітудної модуляції для стабільності контролю, доповненої стохастичним шумом для підвищення порогу чутливості.

3. Динамічне управління. Стимуляція повинна бути подієво-залежною (стимул-спровокованою), активуючись лише при наявності специфічних тригерів (рух, спалах болю), з обов'язковими періодами відсутності стимуляції для запобігання резистентності.

4. Необхідно встановити жорсткі межі безпеки. Обов'язковий автоматичний контроль густини електричного заряду відповідно до типу електрода.

Висновок

Запропонований підхід до проектування алгоритмів адаптивної стимуляції для зменшення фантомного болю у пацієнтів з ампутованими кінцівками на основі поєднання комплексного аналізу вхідних даних, адаптивного кодування сигналів, динамічного керування стимуляцією та безпеки процедури створює можливості для перетворення пасивного ситуативного усунення симптомів на активну нейрореабілітацію, при якій апаратно-програмна організація системи стимуляції виступає містком для відновлення цілісності сприйняття власного тіла пацієнтом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Boomgaardt, J., Dastan, K., Chan, T., Shilling, A., Abd-Elsayed, A., Kohan, L. An algorithm approach to phantom limb pain. *Journal of pain research*. 2022. Oct. P. 3349–3367.
2. Johnson, M. I., Mulvey, M. R., Bagnall, A. M. Transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) for phantom pain and stump pain following amputation in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2015. No. 8. CD007264. P. 1–22.
3. Pagan-Rosado, R., Smith, B. J., Smither, F. C., Pingree, M. J., D'Souza, R. S. Peripheral nerve stimulation for the treatment of phantom limb pain: A case series. *Case Reports in Anesthesiology*. 2023. No. 2023 (1). Art. 1558183.
4. Makin, T. R. Phantom limb pain: thinking outside the (mirror) box. *Brain*. 2021. Vol. 144 (7). P. 1929–1932.

5. Ortiz-Catalan, M. The stochastic entanglement and phantom motor execution hypotheses: a theoretical framework for the origin and treatment of phantom limb pain. *Frontiers in neurology*. 2018. No. 9. Art. 748.
6. Valle, G., Petrini, F. M., Strauss, I., et al. Comparison of linear frequency and amplitude modulation for intraneural sensory feedback in bidirectional hand prostheses. *Scientific reports*. 2018. No. 8 (1). Art. 16666.
7. Valle, G., Katic Secerovic, N., Eggemann, D., et al. Biomimetic computer-to-brain communication enhancing naturalistic touch sensations via peripheral nerve stimulation. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15 (1). P. 1151.
8. Shirvalkar, P., Leriche, R., Saal, J., et al. Personalized, closed-loop deep brain stimulation for chronic pain. *medRxiv*. 2025. 2025-08. URL: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2025.08.11.25333010v1>

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