

Використання методу phantom motor execution (pme) для зменшення фантомних болів у військовослужбовців з ампутацією кінцівок

Потапова Олена Володимирівна¹, Ольшанська Валентина Ігорівна²,
Кальонова Ірина Валентинівна³, Кондратенко Вікторія Володимирівна⁴

Опубліковано	Секція	УДК
30.03.2025	Терапія та реабілітація	615.8:616.8- 009.6/.7:617.57/.58- 089.873-06

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20230216>

Анотація. Військовослужбовці з ампутацією кінцівок під час реабілітації стикаються з низкою проблем, серед яких найпоширенішою є больовий синдром фантомної кінцівки. Фантомний біль кінцівки (ФБК) – це болісне відчуття, яке виникає в частині тіла, яка була ампутувана та виникає, згідно сучасних наукових досліджень, у 50–80% пацієнтів, які перенесли ампутацію. Війна в Україні, яка спричинила велику кількість ампутацій, потребує впровадження новітніх методів реабілітації для ефективного зменшення ФБК і покращення якості життя таких пацієнтів. Одним із перспективних підходів є метод віртуальної та доповненої реальності Phantom Motor Execution (PME), що активно досліджується та застосовується для активації моторної діяльності у пацієнтів з ампутуваними кінцівками, який дозволяє зменшити або навіть усунути фантомні болі. *Мета роботи:* теоретичне дослідження ефективності методу Phantom Motor Execution у зменшенні фантомних болів у військовослужбовців з ампутацією кінцівок, аналіз його впливу на відновлення функціональних можливостей та перспективи його застосування в реабілітаційних програмах для військових. *Об'єкт дослідження:* процес застосування віртуальної та доповненої реальності у процесі сучасної реабілітації військовослужбовців із ампутуваними кінцівками. *Предмет дослідження:* застосування методу Phantom Motor Execution для зменшення фантомних болів у військовослужбовців після ампутації кінцівок і його вплив на відновлення функціональних можливостей. *Методи дослідження:* теоретичний аналіз і узагальнення сучасних науково-методичних літературних даних щодо методу Phantom Motor Execution, його впливу на зменшення фантомного болю у пацієнтів з ампутуваними кінцівками, а також застосування новітніх технологій, таких як міоелектричне розпізнавання патернів, віртуальна та доповнена реальність у процесі

¹ кандидат наук з фізичного виховання та спорту, доцент кафедри терапії та реабілітації, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-5603-7940>; potapovaov18.1@gmail.com

² кафедра терапії та реабілітації, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна, <https://orcid.org/0009-0007-5999-8994>; husky199800@gmail.com

³ кандидат медичних наук, доцент кафедри терапії та реабілітації; Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-9826-923X>; kalenova2608@gmail.com

⁴ кандидат наук з фізичного виховання та спорту, доцент кафедри фізичного виховання та спеціальної підготовки, Університет митної справи та фінансів, вул. Володимира Вернадського 2/4, м. Дніпро, <https://orcid.org/0009-0007-5999-8994>; Vika.kidon@gmail.com

реабілітації; аналіз клінічних випробувань і результатів застосування методу у міжнародній медичній практиці. Проаналізовано вплив методу РМЕ на нейрофізіологічні та нейропластичні процеси та інтеграцію нейротехнологій у реабілітаційний процес пацієнтів з ампутованими кінцівками. Обґрунтована доречність комплексного поєднання віртуальної реальності з терапевтичними вправами, що відкриває нові горизонти в розвитку сучасної функціональної терапії, та удосконалює біомеханіку патерну повсякденних рухів пацієнтів через стабілізацію їх тіла й підвищення функціонального стану, що значно підвищує їх якість життя.

Ключові слова: ампутація, військовослужбовці, біомеханіка рухів, реабілітація, фантомний біль, віртуальна та доповнена реальність, терапевтичні вправи.

Use of phantom motor execution (pme) method to reduce phantom pain in military servicemen with limb amputations

Annotation. Military personnel with limb amputations face a number of problems during rehabilitation, the most common of which is phantom limb pain syndrome. Phantom limb pain (PLP) is a painful sensation that occurs in the part of the body that has been amputated and occurs, according to modern scientific research, in 50–80% of patients who have undergone amputation. The war in Ukraine, which has caused a large number of amputations, requires the implementation of modern rehabilitation methods to effectively reduce PLP and improve the quality of life of such patients. One of the promising approaches is the virtual and augmented reality method Phantom Motor Execution (PME), which is actively researched and used to activate motor activity in patients with amputated limbs, which allows reducing or even eliminating phantom pain. *Purpose of the work:* theoretical study of the effectiveness of the Phantom Motor Execution method in reducing phantom pain in military personnel with limb amputations, analysis of its impact on the restoration of functional capabilities and prospects for its application in rehabilitation programs for the military. *Object of the study:* the process of using virtual and augmented reality in the process of modern rehabilitation of military personnel with limb amputees. *Subject of the study:* the use of the Phantom Motor Execution method to reduce phantom pain in military personnel after limb amputation and its impact on the restoration of functional capabilities. *Research methods:* theoretical analysis and generalization of modern scientific and methodological literature data on the Phantom Motor Execution method, its impact on reducing phantom pain in patients with limb amputees, as well as the use of the latest technologies, such as myoelectric pattern recognition, virtual and augmented reality in the rehabilitation process; analysis of clinical trials and results of the method in international medical practice. The impact of the PME method on neurophysiological and neuroplastic processes and the integration of neurotechnologies into the rehabilitation process of patients with amputated limbs is analyzed. The relevance of a comprehensive combination of virtual reality with therapeutic exercises is substantiated, which opens new horizons in the development of modern functional therapy and improves the biomechanics of the patient's daily movement pattern by stabilizing their body and improving their functional state, which significantly improves their quality of life.

Keywords: amputation, military personnel, biomechanics of movements, rehabilitation, phantom pain, virtual and augmented reality, therapeutic exercises.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Ампутація ніг так рук у близько 85% відсотках випадків супроводжується виникненням так званого фантомного болю. Він приносить значні страждання та іноді псує якість життя навіть більше, ніж сам факт відсутності кінцівки. З'являються фантомні болі зазвичай вже через декілька днів після оперативного втручання. Але якщо у частини людей через півроку вони зникають повністю, то в

інших стають хронічними. Фантомний біль – це явище, при якому людина має больові відчуття у тій частині тіла, що насправді у неї відсутня. Частіше всього це стосується верхньої або нижньої кінцівки [3]. На момент ампутації периферичні нерви, які раніше іннервували кінцівку, перерізаються, але мозок продовжує «шукати» ці сигнали. Внаслідок цього відбувається так звана кортикальна реорганізація – зміщення зон мозку, що відповідають за чутливість, і виникає хибне сприйняття. Крім того, в місці ампутації можуть утворюватися неврони – патологічні вузли нервової тканини, які спричиняють постійне збудження больових рецепторів. Свою роль відіграють і емоційні фактори – страх, тривога, депресія після втрати частини тіла можуть посилювати інтенсивність фантомного болю. Також до факторів ризику належать хронічний біль до ампутації, складні або повторні операції, затяжливе загоєння рани. Але навіть у пацієнтів без цих факторів фантомний біль може виникнути й потребує лікування [2].

РМЕ реалізується за допомогою системи (Neuromotus, Integrum AB, Швеція), яка використовує міоелектричне розпізнавання патернів для прогнозування моторної волі (рухи фантомної кінцівки), одночасно надаючи пацієнту зворотний зв'язок у режимі реального часу в середовищах віртуальної та доповненої реальності (VR/AR). РМЕ є неінвазивним і нефармакологічним методом лікування, без виявлених побічних ефектів на даний момент [4].

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Мета роботи – теоретичне дослідження ефективності методу Phantom Motor Execution (РМЕ) у зменшенні фантомних болів у військовослужбовців з ампутацією кінцівок, аналіз його впливу на відновлення функціональних можливостей пацієнтів та обговорення перспектив застосування цього методу в реабілітаційних програмах для військових.

Методи дослідження: Теоретичний аналіз і узагальнення сучасних науково-методичних літературних даних щодо методу Phantom Motor Execution (РМЕ), його впливу на зменшення фантомного болю у пацієнтів з ампутуваними кінцівками, а також застосування новітніх технологій, таких як міоелектричне розпізнавання патернів, віртуальна та доповнена реальність у процесі реабілітації. Аналіз клінічних випробувань і результатів застосування методу у медичній практиці.

Об'єкт дослідження – процес застосування віртуальної та доповненої реальності у процесі сучасної реабілітації військовослужбовців із ампутуваними кінцівками.

Предмет дослідження – застосування методу Phantom Motor Execution для зменшення фантомних болів у військовослужбовців після ампутації кінцівок і його вплив на відновлення функціональних можливостей.

Наукова новизна дослідження полягає в аналізі впливу методу РМЕ на нейрофізіологічні та нейропластичні процеси та інтеграції нейротехнологій у реабілітаційний процес пацієнтів з ампутуваними кінцівками. Обґрунтована доречність комплексного поєднання віртуальної реальності з терапевтичними вправами, що відкриває нові горизонти в розвитку сучасної функціональної терапії, та удосконалює біомеханіку патерну повсякденних рухів пацієнтів через стабілізацію їх тіла й підвищення функціонального стану, що значно підвищує їх якість життя.

Результати

ФБК є недостатньо вивченим феноменом, при якому люди з ампутуваними кінцівками відчувають гострий больовий синдром, локалізований у відсутній частині тіла. Цей стан може бути дуже виснажливим і здатний серйозно вплинути на якість життя хворого. Існуючі уявлення про походження цього феномена не можуть пояснити отримані клінічні дані та сформувати закінчену теоретичну базу для його вивчення та лікування. Доктор Макс Ортіс Каталан (Max Ortiz Catalan) із Технологічного університету Чалмерса (Chalmers University of Technology) у Швеції, розробив нову

теорію походження фантомного болю, яку назвав «теорією стохастичної заплутаності» (stochastic entanglement).

Згідно з «теорією стохастичної заплутаності», запропонованою доктором Максом Ортісом Каталаном, після ампутації нейронна мережа, яка раніше контролювала кінцівку, втрачає свою первинну функцію і стає чутливою до взаємодії з сусідніми нейронними структурами. У випадку ФБК таке переплетення відбувається з ноцицептивними нейронами, що відповідають за сприйняття болю.

З нейрофізіологічної точки зору, після ампутації в сенсомоторній корі головного мозку залишається ділянка, позбавлена аферентних імпульсів і моторного контролю. Ця зона не стає повністю неактивною, а може періодично генерувати спонтанні імпульси. Якщо такі імпульси синхронізуються з активністю ноцицептивних структур, це може викликати відчуття болю у відсутній кінцівці [4, 5].

З точки зору нейропластичності, одночасне збудження сенсомоторних і ноцицептивних нейронів сприяє утворенню нових патологічних зв'язків, що призводить до хронічного фантомного болю. Це пояснює, чому не всі пацієнти з ампутацією відчувають фантомний біль: хаотичність і випадковість цього процесу означає, що не у всіх відбувається такий збіг активності.

Для фізичних терапевтів метод РМЕ відкриває нові підходи до реабілітації, зокрема методи активації сенсомоторних областей, що можуть перешкоджати формуванню патологічних зв'язків. Використання міоелектричного контролю, віртуальної реальності та моторної візуалізації може допомогти перенавчити мозок і зменшити фантомний біль шляхом стимуляції залишкових нейронних шляхів.

Загалом, метод РМЕ є інноваційним, науково обґрунтованим підходом до лікування хронічного ФБ. Суть методу полягає у використанні м'язових сигналів від кукси для управління доповненим та віртуальним середовищем. Електричні сигнали у м'язах уловлюються електродами на шкірі. Алгоритми штучного інтелекту перетворюють сигнали руху віртуальної руки реальному часі. Пацієнти бачать себе на екрані з віртуальною рукою на місці відсутньої руки і можуть керувати нею так само, як вони б керували своєю біологічною кінцівкою [7].

У процесі роботи за допомогою веб-камери та екрану пацієнт спостерігає за собою з віртуальною кінцівкою, яка знаходиться в анатомічно правильному положенні відсутньої кінцівки. Маркер на куксі дозволяє системі відстежувати положення фантомної кінцівки в реальному часі. Використовуючи міоелектричне розпізнавання патернів (MPR), віртуальна кінцівка реагує на рухові команди фантомної кінцівки, що дає змогу пацієнту безпосередньо керувати нею. Окрім створення ілюзії повноцінного тіла, цей підхід допомагає адаптувати міоелектричні патерни, які пацієнт використовує для керування рухами.

Також, використання технологій віртуальної реальності дає можливість створювати ігрові терапевтичні завдання ("serious gaming"), що збільшує мотивацію пацієнта і робить реабілітацію ефективнішою.

Метод (РМЕ) впливає на мозок і нервову систему через активацію моторної кори, нормалізацію нейропластичності та відновлення міжпівкульної взаємодії, що зменшує фантомний біль. Використання міоелектричного розпізнавання рухів (MPR) та доповненої реальності (AR) допомагає пацієнту контролювати фантомну кінцівку, що знижує патологічну активність ноцицептивних нейронів і сприяє формуванню нових нейронних зв'язків. Сенсорний зворотний зв'язок і ефект «серйозних ігор» підсилюють терапевтичний ефект, активуючи систему винагороди мозку та сприяючи відновленню контролю над фантомною кінцівкою [6].

РМЕ є комплексним методом, що впливає на центральні та периферичні механізми управління рухами, нейропластичність та ноцицепцію. Він дозволяє

пацієнтам відновити контроль над фантомною кінцівкою, що є ключовим чинником у боротьбі з фантомним болем.

Дослідження Ортіса-Каталана та його колег (2016) [5] показало, що ФБ поступово і стабільно зменшувався у всіх пацієнтів. Спостерігалось значне зниження інтенсивності та частоти болю, особливо таких його характеристик, як "колючий" та "виснажливий". У більшості пацієнтів фантомний біль суттєво впливав на повсякденну активність та якість сну, але після терапії ці показники помітно покращилися. Ефект лікування зберігався протягом щонайменше пів року, а деякі пацієнти змогли значно зменшити прийом знеболювальних препаратів. Загалом, результати підтвердили стійке зниження частоти та інтенсивності болю та його впливу на повсякденне життя.

Даний метод має певні переваги та недоліки, про які необхідно згадати та врахувати під час впровадження у реабілітаційний процес. До переваг можна віднести, те що застосування цього методу не залежить від інтактної контралатеральної кінцівки – може застосовуватися у пацієнтів з двосторонніми ампутаціями. Вимагає реальної м'язової активності у куксі, а не просто спостереження за дзеркальним відображенням. Стимулює нейропластичні зміни на всіх рівнях: корковому, підкорковому та периферичному. Це неінвазивний метод, який не потребує хірургічного втручання чи додаткових медикаментозних засобів. Можливість інтеграції ігрових елементів у терапію робить процес лікування цікавішим і залучає пацієнтів до активного участі, але є і негативні сторони та певні ускладнення в роботі, а саме, пацієнти з важкими когнітивними порушеннями чи слабким зором можуть мати труднощі в інтеракції з технологією. Також необхідне спеціалізоване обладнання (міоелектричні сенсори, VR-системи, спеціальне програмне забезпечення), що може бути дорогим і недоступним для багатьох реабілітаційних центрів в Україні. Фізичні терапевти повинні пройти додаткову підготовку для роботи з РМЕ, що потребує часу та фінансових витрат. Лікування потребує часу (мінімум 12 сеансів), і ефективність може відрізнятись залежно від пацієнта, його стану та рівня мотивації. Обладнання може вимагати оновлення програмного забезпечення, технічної підтримки та заміни комплектуючих, що може створювати додаткові труднощі в умовах медичних закладів.

Висновки

Підсумовуючи все вищезазначене, необхідним є наголосити про особливості впровадження методу РМЕ та роботу з ним, а саме зростаючий попит на реабілітацію ветеранів та військових, кількість яких через війну в Україні значно зростає, що створює потребу у сучасних методах реабілітації, зокрема РМЕ, для лікування фантомного болю та відновлення контролю над протезами. Також, наступна складова – це інтеграція з існуючими реабілітаційними програмами, де РМЕ може бути доповненням до вже впроваджених методик, таких як дзеркальна терапія, електростимуляція, терапевтичні й індивідуально підібрані кінезіологічні вправи та VR-терапія. Його поєднання з іншими підходами може підвищити ефективність лікування. Для роботи та підготовки фахівців в Україні необхідна державна підтримка та грантове фінансування. За умови визнання методу РМЕ ефективним в Україні, можливе залучення державного фінансування або міжнародних грантів для закупівлі обладнання та навчання відповідних фахівців.

Перспективи подальших досліджень обмежуються низкою об'єктивних перешкод, а саме: високою вартістю обладнання та програмного забезпечення; обмеженою кількістю фахівців, що володіють методом, а також необхідність адаптації протоколів лікування до реалій української медицини.

Список використаних джерел

1. Клініко-нозологічна та клініко-анатомічна характеристика постраждалих із мінно-вибуховою травмою на ранньому госпітальному етапі надання медичної

допомоги в умовах сучасних бойових дій / С. Гур'єв та ін. Kharkiv surgical school. 2016. Т. 78, № 3.

2. Сучасні методи боротьби з фантомним болем. Режим доступу: <https://medicasano.com.ua/blog/suchasni-metodyky-borotby-z-fantomnym-bolem-pislia-amputatsij-dosvid-fakhivtsiv-medicasano/>.

3. Що таке фантомні болі та як правильно їх лікувати. Всеукраїнський центр протезування та реабілітації «Здоров'я». Режим доступу: <https://health-ukraine.com.ua/uk/fantomnie-boly/>.

4. Lendaro E., Hermansson L., Burger H., Van der Sluis C.K., McGuire B.E., Pilch M., Bunketorp-Käll L., Kulbacka-Ortiz K., Rignér I., Stockselius A., Gudmundson L., Widehammar C., Hill W., Geers S., Ortiz-Catalan M. Phantom motor execution as a treatment for phantom limb pain: protocol of an international, double-blind, randomised controlled clinical trial. *Rehabilitation Medicine Protocol*. 2023. https://bmjopen.bmj.com/content/8/7/e021039?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 05.02.2025).

5. Ortiz-Catalan M., Gudmundsdottir R., Kristoffersen M., et al. Phantom motor execution facilitated by machine learning and augmented reality as treatment for phantom limb pain: a single group, clinical trial in patients with chronic intractable phantom limb pain // *The Lancet*. – 2016. – Vol. 388, №10062. – P. 2885-2894. – DOI: 10.1016/S0140-6736(16)31598-7.

6. Prosthetic embodiment: systematic review on definitions, measures, and experimental paradigms // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2022. – Vol. 19, Article №37. – DOI: 10.1186/s12984-022-01006-6.

7. Ортіс-Каталан М. Phantom limb movements enhanced by augmented reality provide relief for pain in patients / М. Ортіс-Каталан // *Medical Xpress*. – 2016. – 19 груд. – Режим доступу: <https://medicalxpress.com/news/2016-12-phantom-movements-augmented-reality-patients.html>. – Дата звернення: 06 лют. 2025.