

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОМІОСТИМУЛЯЦІЇ КЕРОВАНОЇ ЕЛЕКТРОМІОГРАМОЮ

Козяр В. В., доц.
kozyarvasiliy@gmail.com

Феч О.О., студент
ardn@meta.ua

Факультет біомедичної інженерії
Національний технічний університет
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна

Реферат – Електроміостимуляція – метод, широко застосовуваний у спортивній практиці та у програмах реабілітації для відновлення активності м'язів і подолання болю. Клінічні випробування продемонстрували, що міостимуляція, контрольована електроміограмою, має переваги при відновленні рухової функції кінцівок у пацієнтів з інсультом. Однак, використання стимуляції із біологічним зворотнім зв'язком (БЗЗ) у клінічній практиці обмежене через розбіг даних, які б підтверджували її ефективність. Ціль даної роботи проаналізувати останні дослідження щодо застосування такого методу електростимуляції при реабілітації пацієнтів.

Ключові слова – атрофія м'язів, електроміостимуляція, електроміограма, БЗЗ.

I. ВСТУП

Електростимуляція – метод, широко застосовуваний у спортивній практиці та у програмах реабілітації для відновлення активності м'язів (електроміостимуляція, ЕМС) і подолання болю (транскутанна електронейростимуляція, ТЕНС).

В основному ЕМС використовується для лікування атрофії м'язів під час та після іммобілізації внаслідок травм, тощо. Вважається, що електрична стимуляція прискорює оновлення м'язової тканини і скорочує тривалість реабілітації. Тим не менш, неправильне використання методу може бути неефективним або призвести до ускладнень.

Міостимуляція проводиться з допомогою електричних імпульсів, що через електроди на шкірі стимулюють нерви, які іннервують специфічну групу м'язів (рис. 1).

При активному русі мозок не тільки надсилає команду у вигляді електричного сигналу до нервових волокон, викликаючи скорочення м'язів, але й отримує зворотню інформацію про результат дії стимулу. При електричній стимуляції імпульс струму до нервових волокон, який викликає скорочення

м'язів, генерується стимулятором, який, здебільшого, не може оцінити результат стимулювання.

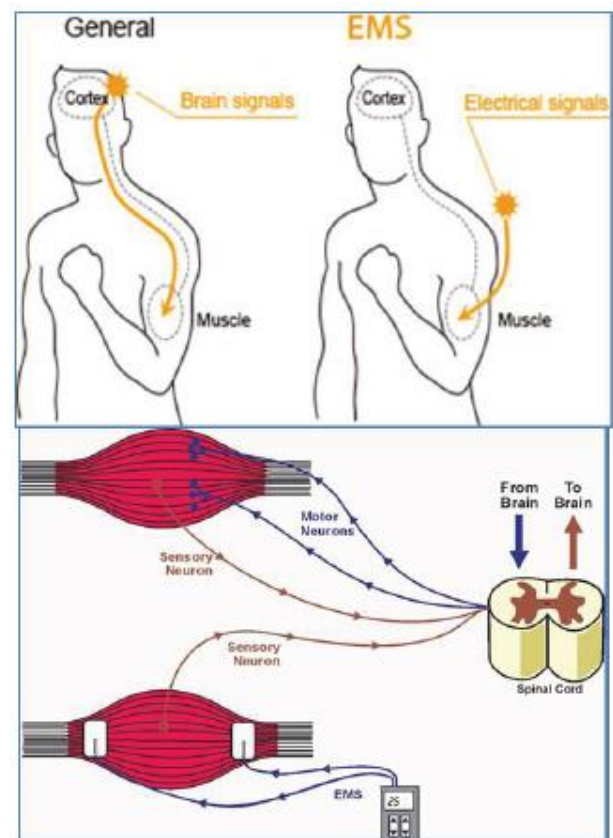


Рис. 1. Стимуляція рухового нейрона [1]

В обох випадках подразнення подається до м'язових волокон, які виконують елементарну механічну роботу. При цьому м'яз не відрізняє команду стимулятора від команди, що надійшла від мозку людини. Змінні параметри ЕМС (частота імпульсів, їх тривалість, амплітуда, форма, тривалість спокою, тощо) дозволяють запускати скорочення різних типів м'язових волокон. Саме тому міостимуляція використовується як додатковий метод розвитку сили спортсменів, а також, як метод активного відновлення скорочень м'язів, виключених із активної дії. Електрична стимуляція забезпечує розвиток мускулатури без перевтоми серцево-судинної системи та психіки, при низькому навантаженні суглобів і сухожиль.

На відміну від циклічної міостимуляції, стимуляція, що керується електроміограмою (ЕМГ), вимагає активної участі пацієнтів і добровільних зусиль. Тому такий тип ЕМС є потенційно ефективнішим, ніж циклічна стимуляція [1].

II. МЕТА

Метою даної роботи є аналіз оптимальних параметрів стимуляції, які б забезпечували максимальну ефективність в поєднанні з комфортом для пацієнта, при використанні ЕМС, керованої ЕМГ.

III. МАТЕРІАЛИ

Матеріалами для даної статті є результати клінічних випробувань, в яких порівнювалися ефекти застосування міостимуляції під контролем ЕМГ в порівнянні з відсутністю лікування або іншим видом реабілітації пацієнтів з порушеннями рухової функції верхніх кінцівок внаслідок інсульту; публікації з історії розвитку ЕМС, мета-аналіз та огляд з теми.

IV. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

М'язи працюють по-різному в залежності від сили, частоти та ширини електричного імпульсу. Але для ефективної роботи повинна бути активована велика кількість м'язових волокон, що залежить від енергії стимуляції. Чим вище енергія стимуляції, тим більша кількість м'язових волокон залучається у скорочення. При ЕМС всі рухові одиниці стимулюються і активуються одночасно. Електричний струм проходить шляхом

найменшого опору, що виражається в більшій активації м'язових волокон 2-го типу, які мають більший діаметр і менший опір, в порівнянні з волокнами 1-го типу, до складу яких входять дрібні рухові одиниці з великим опором. Переважна активація волокон 2-го типу виражається в збільшенні метаболічних потреб м'язової тканини, зниженням в ній рН і зменшенням рівня креатинфосфату.

Крім того, важливим є поняття хронаксії та реобазис, оскільки вважається, що реобаза є мінімальною силою сигналу достатньої тривалості, яка викликає реакцію м'яза, а хронаксія – мінімальна тривалість ефективного імпульсу при силі стимулу, що дорівнює подвоєній реобазис. Саме тому визначення оптимального типу стимуляції представляє інтерес для досліджень в області реабілітації, в тому числі і спортивній [3].

Основними параметрами міостимуляції є частота, тривалість імпульсу, форма імпульсу, робочий цикл та інтенсивність.

Частота стимуляції є показник, що виражає число повторюваних стимулюючих імпульсів струму в секунду і вимірюється в Гц. Залежно від частоти стимулюючого струму в різній мірі активуються різні нервові і м'язові волокна. М'язові волокна, що повільно реагують, активуються на низьких частотах імпульсів до 15 Гц, а швидкі волокна сприймають частоти понад 35 Гц. При імпульсах з частотою 45-70 Гц відбувається тривале напруження м'язів в поєднанні зі швидкою м'язовою втомою. Дане явище викликане підсумовуванням одиночних м'язових скорочень і формуванням зубчастого тетануса, при якому м'яз встигає частково розслабитися, або гладенького тетануса, під час якого фаза розслаблення відсутня. Тетанус викликає більше м'язове зусилля, однак, в той же час, призводить до посилення метаболічних процесів, накопичення численних продуктів розпаду, утруднення м'язового кровотоку, чим спричинює швидку втому [4].

При міостимуляції можуть бути використані різні форми імпульсів, при цьому струм може бути монофазним, тобто мати постійну полярність, або двофазним, при якому полярність імпульсів в процесі стимуляції змінюється на протилежну. Двофазні струми початково зарекомендували

себе як більш фізіологічні, що дозволяють досягти ефекту м'язового скорочення при використанні меншої інтенсивності стимуляції і, відповідно, викликають менш виражені відчуття дискомфорту [5].

Показник тривалості імпульсу визначає час одного окремого імпульсу в мікросекундах. У двофазних токах дане значення визначається сумарною тривалістю обох фаз. У загальному випадку від тривалості імпульсу залежить глибина впливу на м'язові тканини. У більшості реабілітаційних протоколів використовувалася тривалість імпульсів від 200 до 700 мкс.

Робочий цикл визначається співвідношенням періоду напруги і періоду розслаблення. Даний параметр виражають у відношенні одного періоду до іншого. У період розслаблення відбувається відновлення іонних градієнтів і нейротрансмітерів нервової і м'язової тканин, за рахунок чого знижується ймовірність настання м'язової втоми, але значне збільшення періоду розслаблення призводить до зменшення сумарного часу стимуляції, що знижує ефективність методу.

Інтенсивність - це сила струму, з якою проводиться стимуляція, в міліамперах, або амплітуда імпульсів в вольтах. Чим вище інтенсивність, тим більше ефект деполяризації в структурах, розташованих під електродами, і тим більші прояви м'язового скорочення. При цьому імпульси великої тривалості найчастіше вимагають меншої інтенсивності за рахунок збільшення часу залучення до процесу стимуляції м'язових тканин.

Широке варіювання згаданих вище параметрів є перепоною при зборі доказової бази, а також утруднює вибір оптимального протоколу проведення тренувань або процедур [3].

Із залученням ЕМГ до процесу ЕМС пацієнт отримує можливість тренувати уражені або ослаблені м'язи в умовах, коли порушений фізіологічний зв'язок між м'язом і мозком. Керуючи потужністю м'язових скорочень, так само, як і при проведенні вправ лікувальної або адаптивної фізкультури, людина тренує силові якості м'язів і створює «новий» рефлекторний зв'язок паралізованих м'язів із ураженими структурами нервової системи. Таким чином утворюється БЗЗ, що сприяє оптимізації м'язової функції [1].

V. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Згідно з останніми публікаціями, проведені клінічні випробування продемонстрували, що ЕМС, контрольована ЕМГ, може зміцнювати м'язи, зменшувати спастичність, збільшити діапазон руху та реорганізувати нервові ланцюги після інсульту. Найбільш повний аналіз досягнень в області міостимуляції можна знайти в мета-аналізі, проведеному К. Monte-Silva та співавторами [2], де розглянуто 24 дослідження, серед яких у 6-ох були залучені пацієнти у гострій або субгострій фазі відновлення. У результаті було визначено, що найкращі результати використання ЕМС, керованої ЕМГ, спостерігались у пацієнтів, які пережили інсульт менше, ніж за 3 місяці до початку ЕМС. І хоча для пацієнтів з більш пізнім періодом реабілітації теж був помічений позитивний вплив такого типу стимуляції, але за показниками він не перевищував результатів циклічної міостимуляції.

Найчастіше використовувані параметри стимуляції були наступними: тривалість імпульсу 200 мкс [6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17] та 300 мкс [18,19]; частота модуляції 50 Гц [7,8,9,10,11,12,13,14,17,19] та 35 [14,17] Гц; співвідношення тривалості стимуляції до пауз 1:5 [7,8,9,10,13,20]. Вказані параметри відповідають тільки тим дослідженням, в результаті яких відбувалися значні позитивні зміни у руховій діяльності верхніх кінцівок пацієнтів.

Такі налаштування стимулятора відповідають «російському протоколу» [2,21], який найчастіше застосовується у спортивній практиці.

Він передбачає наступні значення параметрів стимуляції:

- несучий сигнал - синусоїдальний або трикутний,
- частота - більше 2500 Гц,
- частота модуляції - 50 Гц,
- амплітуда - залежить від вихідного імпедансу стимулятора, як правило, перевищує 90 В,
- тривалість стимуляції - 10 с,
- пауза - 50 с,
- кількість стимулювань - 10 щодня,
- кількість тренувань - 5 разів щотижня [21].

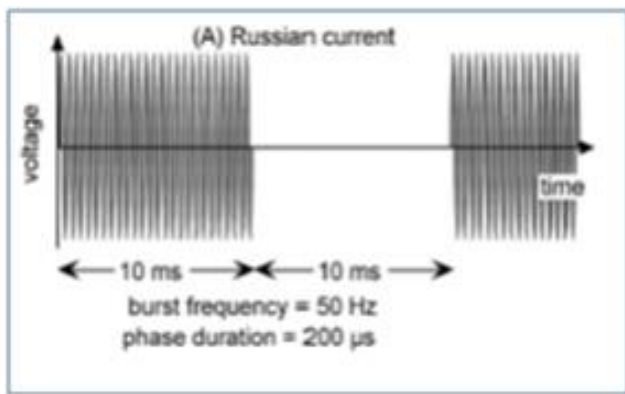


Рис. 2. Вигляд сигналу стимуляції «російського протоколу» [22]

Як вже зазначалося раніше, використання ЕМС, керованої ЕМГ, при реабілітації пацієнтів більше ніж через три місяці після інсульту потребує подальшого дослідження, оскільки виявлені покращення сили та активності м'язів кінцівок не відрізнялися від змін, виявлених у пацієнтів, відновлювальна терапія яких складалася лише з міостимуляції у комплексі з вправами [2]. Але, ряд досліджень [18,23,24], проведених за участі пацієнтів в гострій та субгострій фазі після інсульту показали, що використання ЕМГ для керівництва процесом ЕМС призводить до значних покращень моторних функцій м'язів та функцій балансу.

На противагу їм, аналогічні дослідження, проведені S. Dorsch та співавторами [25], показали, що міостимуляція, що має зв'язок із ЕМГ, дійсно покращує силу та активність м'язів, але не більше, ніж звичайна терапія. Дане дослідження проводилося на дуже слабких пацієнтах в ранньому періоді після інсульту. Використовувалися такі параметри стимуляції:

- частота модуляції - 70 Гц,
- ширина імпульсу - від 100 до 250 мкс,
- наростання і спадання амплітуди пачок стимулюючих імпульсів - 1 с,
- цикл робот - 1:1,
- форма імпульсу - асиметрична двофазна,
- інтенсивність - 10 до 80 мА [25].

Як видно, всі основні налаштування відрізнялися від розглянутих вище, з чого можна зробити висновок, що відмінності параметрів стимуляції можуть мати вирішальне значення для ефективності

реабілітації пацієнтів. Але варіювання або ж відсутність подробиць щодо параметрів стимуляції значно обмежують можливості створення оптимального протоколу, за якого можна досягти найкращих результатів.

Розробка методів електростимуляції є серйозним завданням, для вирішення якої необхідні подальші дослідження. Також важливо приділити увагу ефективності поєднання стимуляції з іншими методами реабілітації.

VI. ВИСНОВКИ

1. Великою перевагою методу електроміостимуляції є можливість його використання як окремо, так і спільно з іншими методами реабілітації. При цьому ефект проведення комбінованої програми відновного лікування більш виражений, ніж при традиційних способах.

2. На даний момент не створено оптимального протоколу стимуляції пацієнтів, який мав би підтверджену ефективність при застосуванні у клінічних умовах.

3. Доведено, що ЕМС, яка контролюється ЕМГ, дає кращі результати на ранніх етапах проведення реабілітації пацієнтів після інсульту.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Pavlović, R. et al.: Electro-muscle stimulation - the application in practice Acta Kinesiologica 10 (2016) Suppl 1: 49-55.
- [2] Monte-Silva K, Piscitelli D, Norouzi-Gheidari N, Batalla MAP, Archambault P and Levin MF: Electromyogram-related neuro-muscular electrical stimulation for restoring wrist and hand movement in Poststroke hemiplegia: A systematic review and meta-analysis. Neurorehabil Neural Repair 33: 9 6-111, 2019.
- [3] Вишне夫斯基, К. А., Румянцев, А. Ш., Смирнов, А. В., & Коростелева, Н. Ю. (2015). Возможности применения накожной билатеральной электромиостимуляции: от космической медицины к реабилитации инвалидов. Нефрология, 19(1).
- [4] Николаев А.А. Электростимуляция в спорте. Смоленск, СГИФК, 1999, 74 с.
- [5] Baker LL, Bowman BR, McNeal DR. Effects of waveform on comfort during neuromuscular electrical stimulation. Clin Orthop. 1988;233:75-85.
- [6] Francisco G, Chae J, Chawla H, et al. Electromyogram-triggered neuromuscular stimulation for improving the arm function of acute stroke survivors: a randomized pilot study. Arch Phys Med Rehabil. 1998;79:570-575.
- [7] Cauraugh J, Light K, Kim S, Thigpen M, Behrman A. Chronic motor dysfunction after stroke: recovering wrist and finger extension by electromyography-triggered neuromuscular stimulation. Stroke. 2000;31:1360-1364.
- [8] Cauraugh JH, Kim S. Two coupled motor recovery protocols are better than one: electromyogram-triggered neuromuscular

- stimulation and bilateral movements. *Stroke*. 2002;33:1589-1594.
- [9] Cauraugh JH, Kim SB. Stroke motor recovery: active neuromuscular stimulation and repetitive practice schedules. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2003;74:1562-1566.
- [10] Cauraugh JH, Kim SB. Chronic stroke motor recovery: duration of active neuromuscular stimulation. *J Neurol Sci*. 2003;215:13-19.
- [11] Kimberley TJ, Lewis SM, Auerbach EJ, Dorsey LL, Lojovich JM, Carey JR. Electrical stimulation driving functional improvements and cortical changes in subjects with stroke. *Exp Brain Res*. 2004;154:450-460.
- [12] Hara Y, Ogawa S, Muraoka Y. Hybrid power-assisted functional electrical stimulation to improve hemiparetic upperextremity function. *Am J Phys Med Rehabil*. 2006;85:977-985.
- [13] Bhatt E, Nagpal A, Greer KH, et al. Effect of finger tracking combined with electrical stimulation on brain reorganization and hand function in subjects with stroke. *Exp Brain Res*. 2007;182:435-447.
- [14] Shin HK, Cho SH, Jeon HS, et al. Cortical effect and functional recovery by the electromyography-triggered neuromuscular stimulation in chronic stroke patients. *Neurosci Lett*. 2008;442:174-179.
- [15] Cauraugh JH, Coombes SA, Lodha N, Naik SK, Summers JJ. Upper extremity improvements in chronic stroke: coupled bilateral load training. *Restor Neurol Neurosci*. 2009;27: 17-25.
- [16] Hong IK, Choi JB, Lee JH. Cortical changes after mental imagery training combined with electromyography-triggered electrical stimulation in patients with chronic stroke. *Stroke*. 2012;43:2506-2509.
- [17] Jonsdottir J, Thorsen R, Aprile I, et al. Arm rehabilitation in post stroke subjects: a randomized controlled trial on the efficacy of myoelectrically driven FES applied in a task-oriented approach. *PLoS One*. 2017;12:e0188642.
- [18] Shindo K, Fujiwara T, Hara J, et al. Effectiveness of hybrid assistive neuromuscular dynamic stimulation therapy in patients with subacute stroke: a randomized controlled pilot trial. *Neurorehabil Neural Repair*. 2011;25:830-837.
- [19] Thorsen R, Cortesi M, Jonsdottir J, et al. Myoelectrically driven functional electrical stimulation may increase motor recovery of upper limb in poststroke subjects: a randomized controlled pilot study. *J Rehabil Res Dev*. 2013;50:785-794.
- [20] Kwakkel G, Winters C, van Wegen EE, et al. Effects of unilateral upper limb training in two distinct prognostic groups early after stroke: the EXPLICIT-stroke randomized clinical trial. *Neurorehabil Neural Repair*. 2016;30:804-816.
- [21] Zaciorski, V., Kremer, V. (2009). *Science and practice in strength training*. Beograd.
- [22] Ward, A. R., W. G. Oliver and D. Buccella (2006). "Wrist extensor torque production and discomfort associated with low-frequency and burst-modulated kilohertz-frequency currents." *Physical Therapy* 86(10): 1360-1367.
- [23] Qian Q, Hu X, Lai Q, Ng SC, Zheng Y, Poon W. Early stroke rehabilitation of the upper limb assisted with an electromyography-driven neuromuscular electrical stimulation-robotic arm. *Front Neurol*. 2017;8:447.
- [24] Park JS, Choi JB, An DH, Chang MY. Effects of mental practice combined with electromyogram-triggered electrical stimulation for upper extremity function in stroke patients. *J Phys Ther Sci*. 2017;29:1819-1820.
- [25] Dorsch S, Ada L, Canning CG. EMG-triggered electrical stimulation is a feasible intervention to apply to multiple arm muscles in people early after stroke, but does not improve strength and activity more than usual therapy: a randomized feasibility trial. *Clin Rehabil*. 2014;28:482-490.

УДК 616-08-039.33

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМИОСТИМУЛЯЦИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОМИОГРАММОЙ

Козяр В. В., доц.
kozyarvasiliy@rambler.ru

Феч О.О., студент
ardn@meta.ua

Факультет биомедицинской инженерии
Национальный технический университет
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
г. Киев, Украина

Реферат – Электромиостимуляция - метод, широко применяемый в спортивной практике и в программах реабилитации для восстановления активности мышц и преодоления боли. Клинические испытания показали, что миостимуляция, контролируемая электромиограммой, имеет преимущества при восстановлении двигательной функции верхних конечностей у пациентов с инсультом. Однако, использование такого типа стимуляции в клинической практике ограничено из-за отсутствия доказательной базы, подтверждающей ее эффективность. Цель данной работы проанализировать последние исследования по применению такого метода стимуляции при реабилитации пациентов.

Ключевые слова – миостимуляция, ЭМГ, нейростимуляция, стимуляция мышц, электромиограмма.

UDC 616-08-039.33

EFFICIENCY OF EMG-CONTROLLED ELECTROMYOSTIMULATION

Kozyar V., assistant professor
kozyarvasiliy@rambler.ru

Fech O., student
ardn@meta.ua

Faculty of Biomedical Engineering
National Technical University
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine

Abstract – Electromyostimulation is a method widely used in sports practice and in rehabilitation programs to restore muscle activity and overcome pain. Clinical trials have shown that myostimulation, controlled by an electromyogram, has advantages in restoring motor function of the upper limbs in patients with stroke. However, the use of this type of stimulation in clinical practice is limited due to the lack of evidence supporting its effectiveness. The purpose of this work is to analyze recent studies on the use of this method of stimulation in the rehabilitation of patients.

Key words – myostimulation, EMG, neurostimulation, muscle stimulation, electromyogram.