

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ПАРЕЗАХ

© 2019 г. А. С. Ключков<sup>1</sup>, \*, А. Е. Хижникова<sup>1</sup>, А. М. Котов-Смоленский<sup>1</sup>,  
Л. А. Черникова<sup>1</sup>, Н. А. Супонева<sup>1</sup>, М. А. Пирадов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ Научный центр неврологии, Москва, Россия

\*E-mail: Anton.s.klochkov@gmail.com

Поступила в редакцию 01.06.2018 г.

После доработки 30.09.2018 г.

Принята к публикации 01.11.2018 г.

Двигательная реабилитация является одной из ключевых задач восстановления индивидуальной независимости пациентов перенесших инсульт. Нервно-мышечная электростимуляция синхронизированная с выполнением двигательной задачи, известная как функциональная электростимуляция (ФЭС), является проверенным и широко применяемым методом. За более чем 40 лет исследования ФЭС были установлены принципы безопасной стимуляции нервов и мышц, а так же методы, направленные на увеличение силы пораженных мышц. В данном обзоре представлена информация о последних технологиях ФЭС, клинических и фундаментальных исследованиях, обсуждены перспективы и направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** функциональная электростимуляция, инсульт, гемипарез, ходьба, реабилитация, ассистивные технологии.

**DOI:** 10.1134/S013116461903007X

Улучшение двигательных функций верхних конечностей занимает центральное место в реабилитации больных перенесших инсульт, так как именно с этим напрямую связано качество жизни пациентов [1]. С этой целью применяется весь арсенал современных реабилитационных технологий (ЛФК, робото- и механотерапия, виртуальная реальность, интерфейс мозг-компьютер).

Сокращения мышц паретичных конечностей у пациентов перенесших инсульт могут быть вызваны посредством электрической стимуляции мышц, приложенной как к мышцам, так и к периферическим нервам, иннервирующим их. Электромиостимуляция, применяемая во время выполнения движения, и воздействующая на паретичные мышцы, вовлекающиеся в двигательный акт, получила название функциональной электростимуляции (ФЭС). В последние десятилетия было проведено большое число исследований, направленных на сравнение эффективности применения ФЭС совместно с классическими методами реабилитации и с изолированным применением только классических реабилитационных методов.

Впервые метод ФЭС для помощи в ходьбе применил в 1961 г. *W.T. Liberson* [2, 3], запатентовав его в 1965 г. как метод мышечной стимуляции человека. В своей работе *W.T. Liberson* стимулировал во время ходьбы малоберцовый нерв. В послед-

ствии в 1962 г. *J.H. Moe* и *H.W. Post* [4] создали на этой базе коммерческое устройство для помощи при ходьбе пациентам со слабостью малоберцовых мышц. За 40 последующих лет исследований ФЭС были установлены принципы безопасной стимуляции нервов и мышц, обуславливающие увеличение силы пораженных мышц, и в свою очередь увеличивавшие объем активных движений в суставах паретичных конечностей.

ФЭС осуществляется посредством передачи импульса тока на ствол нерва либо непосредственно на мышцу – при наложении электродов в области двигательных концевых пластин. Как в первом, так и во втором случаях используются чрескожные (поверхностные) и имплантируемые техники. Имплантируемые электроды, как и полностью имплантируемые системы ФЭС применяются в нейропротезировании в случаях, когда требуется регулярное длительное использование стимулятора. В интересах реабилитации чаще применяется техника накожных электродов, существенно упрощающая и ускоряющая применение ФЭС. Важным компонентом ФЭС является контролирующая система, обеспечивающая использование различных триггерных сигналов для синхронизации стимуляции и движения. В этой роли могут использоваться электромиограмма (ЭМГ), а также сигналы различных сенсоров,

позволяющие определить фазу циклического движения и программирующие начало стимуляции ключевого движения. Активизируя триггерный сигнал, контролирующая система одновременно включает стимулятор, осуществляющий раздражение стимулируемого нерва или мышцы. При этом могут быть использованы два принципиально разных протокола ФЭС – “открытый” и “закрытый”.

В 1961 г. у пациентов после инсульта для стимуляции малоберцового нерва впервые был применен протокол “открытый”, согласно которому, получив триггерный сигнал, контроллер включал стимуляцию мышц заданных параметров, не изменявшихся в зависимости от осуществляемых в данный момент движений.

В отличие от “открытого” “закрытый” протокол предполагает наличие обратной связи от стимулируемой мышцы или сегмента тела, изменяющей амплитуду стимула в реальном масштабе времени. В качестве обратной связи в таком протоколе также могут использоваться ЭМГ или сигналы биомеханических датчиков (гониометров, акселерометров и т.д.). В случае использования “закрытого” протокола система, получив обратную связь, изменяет амплитуду электрического стимула до необходимого (для осуществления целевого движения) минимума. Несмотря на то, что “закрытый” протокол позволяет точнее контролировать движения при нейропротезировании, допуская их выполнения также в интересах реабилитации, в реабилитации он практически не используется [5, 6], причиной чему служат значительные помехи, затрудняющие возможности чистой регистрации ЭМГ на фоне электрической стимуляции. В последнее десятилетие предпринимаются активные попытки создания совершенной системы ФЭС с закрытым протоколом, в которых для формирования индивидуального паттерна для запуска стимуляции рядом исследователей предлагается использование повторяющихся циклических последовательностей и искусственных нейронных сетей.

В настоящее время существует достаточно большое количество как коммерческих систем ФЭС, так и научных прототипов, использующихся в реабилитации и в качестве ассистивных технологий.

Классификацию систем ФЭС в целом можно представить следующим образом:

1. По назначению: а) ассистивная, б) реабилитационная;
2. По используемому протоколу: а) открытый, б) закрытый;
3. По степени инвазивности: а) внешние, б) имплантируемые (частично или полностью);
4. По методу синхронизации с движением (триггеру): а) механический (кнопка в стельке

обуви), б) ЭМГ, в) кинематический (гониометрия, акселерометрия и т.д.), г) ручной (нажатие кнопки пациентом или инструктором);

5. По техническим характеристикам: а) количество каналов, амплитуда, частота, форма тока и т.д.

### **Обзор методов восстановления движений у пациентов, перенесших инсульт, с использованием функциональной электромиостимуляции**

*Применение ФЭС при восстановлении функции локомоции.* Двигательная реабилитация после инсульта включает в себя две масштабных задачи: восстановление локомоции и восстановление бытовой функции руки.

С момента своего возникновения ФЭС хорошо зарекомендовала себя в качестве методики восстановления двигательных функций нижней конечности, чему посвящено большое количество систематических обзоров [7–9].

Одним из методов реабилитации, получивших широкое применение, стала ФЭС передней большеберцовой и малоберцовой мышц паретичной ноги при ходьбе во время фазы переноса. Большинство коммерческих моделей используют в этих случаях открытый протокол стимуляции. В настоящее время наиболее широкое применение получили такие поверхностные чрескожные стимуляторы как: *Ness L300*, *Odstock*, *Walkaide* (рис. 1) и стимуляторы с имплантируемыми электродами: *STIMuSTEP* (рис. 2) и *ActiGait* (рис. 3).

В подавляющем большинстве предлагаемых в настоящее время технологических решений для ФЭС рекомендуется использование накожных электродов, как обладающих при бытовом их применении меньшим числом недостатков.

В ряде крупных исследований эффективности применения ФЭС при слабости мышц голени вследствие постинсультного пареза использовались прототипы носимых аппаратов ФЭС с накожными электродами. При этом помимо мышц разгибателей голеностопного сустава, в ряде клинических исследований оценивалась эффективность ФЭС нескольких групп мышц.

Так, в 2004 г. учеными из США было проведено рандомизированное плацебо контролируемое исследование [10], целью которого являлось определение эффективности метода ФЭС, для чего пациенты с ОНМК ( $n = 41$ ) были разделены на 3 группы: основную ( $n = 13$ ), получавшую ФЭС совместно с классическими методами двигательной реабилитации, контрольную ( $n = 15$ ) получавшую только классические методы двигательной реабилитации и группу плацебо ( $n = 13$ ). У пациентов основной группы ФЭС проводили посредством 2-х канального стимулятора, элек-

троды которого накладывали на четырехглавую и двуглавую мышцы бедра, переднюю большеберцовую мышцу и срединную головку икроножной мышцы. При этом пациент находился в положении лежа на здоровом боку, а его паретичная нога — в облегченной среде, созданной специальными подвесами. В исследовании использовали следующий протокол ФЭС: длительность импульса — 0.3 мс, частота — 30 Гц, амплитуда импульса от 20 до 30 мА, последовательность электрических стимулов соответствовала последовательности сокращения мышечных групп, реализующих ходьбу в норме. Занятия с применением ФЭС длились 30 мин и проводились в течение трех недель пять дней в неделю. Пациенты плацебо группы получали электрическую стимуляцию мышц на выключенном приборе с такими же параметрами стимуляции что и в основной группе, за исключением продолжительности стимуляции, длительность которой составляла 60 мин. Для обеспечения эффекта плацебо пациентам говорили, что электрическую стимуляцию они могут не ощущать. Результаты показали увеличение изометрического сокращения мышц сгибателей и разгибателей голеностопного сустава, со значительным преобладанием в основной группе ( $p < 0.05$ ). Так же в группе ФЭС в сравнении с двумя другими группами сопротивление со стороны спастичных мышц отмечалось значительно меньшее в процессе произвольного разгибания стопы ( $p < 0.05$ ). Среди пациентов основной группы 84.6% к концу курса лечения могли самостоятельно ходить, в группах плацебо и контроля процент самостоятельно ходящих пациентов при этом составил 60.0 и 46.2% соответственно. Опираясь на эти результаты, исследователи пришли к заключению, что применение ФЭС в совокупности с классическими методами реабилитации в острой стадии инсульта имеет преимущество перед изолированным применением классических методов, благоприятно влияя на развитие моторных навыков.

В 2010 г. группой американских специалистов было проведено рандомизированное перекрестное исследование [11], нацеленное на определение влияния метода ФЭС на мышцы сгибатели и разгибатели стопы в процессе восстановления навыка ходьбы у пациентов в хронической стадии инсульта. В эти исследования были включены пациенты, которые были способны идти, поддерживая непрерывную ходьбу, не менее 15 мин, способные надеть самостоятельно или с посторонней помощью 4 раза в день устройство ФЭС. В течение всего курса лечения у пациентов не применялись методы традиционной двигательной реабилитации. В ходе исследования метод *A* предполагал ношение аппарата, оснащенного ФЭС, в течение 6–8 ч в день. Пациент должен был проходить за несколько сессий не менее 1 ч в день. Пациенты, получавшие лечение по методу *B*, долж-



Рис. 1. Носимые чрескожные электростимуляторы. А — Ness L300 (США), Б — Walkaide (США), В — Odstock с сенсорной стелькой (Великобритания).

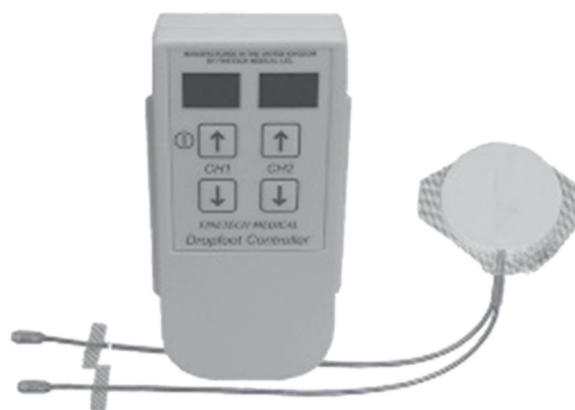


Рис. 2. Электростимулятор с имплантируемыми электродами STIMuSTEP (Великобритания).



Рис. 3. Электростимулятор с имплантируемыми электродами ActiGait (Дания).

ны были только проходить не менее 1 ч в день, без использования ФЭС. По истечении 3 мес., следуя протоколу исследования, условия в группах ме-

нялись на противоположные. Методом рандомизации в группу А (метод А–В) было включено 15 пациентов, а в группу В (метод В–А) 13 пациентов. ФЭС обеспечивалась с помощью двухканального стимулятора. Стимуляция сгибателей стопы осуществлялась в начале фазы опоры, стимуляция разгибателей стопы – в конце фазы опоры. Триггерный механизм состоял из чувствительных кнопок, которые располагались в области пятки и плюснефалангового сочленения. Для стимуляции использовались карбоновые электроды  $5 \times 5$  см, частота стимуляции варьировалась от 30 до 50 Гц, интенсивность и другие настройки ФЭС корректировались в процессе занятий, опираясь на визуальное мышечное сокращение в ответ на стимуляцию, а также отсутствие дискомфорта у пациентов. После 3 мес тренировок был отмечен ряд изменений, а именно: улучшение результатов 6-ти минутного теста ходьбы, равные для групп А и В, соответственно 47.7 и 18.4 м ( $p < 0.05$ ). Время, затраченное на выполнение функционального профиля *modified Emory Function Ambulatory Profile (mEFAP)*, включавшего ходьбу по полу с различным покрытием, вставание со стула, подъем и спуск по лестнице и обхождение препятствий, снизилось на 23.7 с ( $p = 0.08$ ) в группе А и в группе В на 9.8 с. Показатели по шкале *Stroke Impact Scale (SIS)* в группе А увеличились на 23.5 баллов, в группе В на 3.6 балла ( $p = 0.03$ ). После смены условий тренировок в группе А пациенты прошли дополнительно 9.3 м при 6-метровом тесте ходьбы, снизили затраты времени на выполнение *mEFAP* на 7.2 с, и получили 24.8 баллов по шкале *SIS*. Общий прирост (сравнение до и после) в каждой группе составил: 57.1 и 32.3 м в оценке двигательных возможностей посредством 6 метрового теста ходьбы в группах А и В соответственно. Время выполнения *mEFAP* для групп А и В соответственно снизилось на 30.9 и 21.6 с. Показатели оценки по шкале *SIS* увеличились на 45.4 и 33.4 балла для групп А и В. При оценке спастичности и мышечной силы по истечении 6-ти месячного курса тренировок, статистически значимых изменений со стороны мышечного тонуса в сгибателях стопы в обеих группах не наблюдалось. Значительное увеличение силы мышц – разгибателей стопы наблюдалось у участников группы А ( $p = 0.04$ ) в середине исследования (после 3-х мес.). В конце тренировочных мероприятий (после 6 мес.) значительное увеличение мышечной силы подошвенных разгибателей наблюдалось в группе В ( $p = 0.04$ ). Результаты данного исследования позволили специалистам заключить, что применение ФЭС благоприятно влияет на улучшение навыков ходьбы у пациентов с гемипарезами, позволяя сохранить эффекты, достигнутые посредством ФЭС, по прошествии даже 3-х мес.

В 2011 г. группой специалистов было проведено более крупное исследование [12], целью которого было установить терапевтические эффекты функциональной электростимуляции большеберцовой мышцы голени, направленные на снижение спастичности мышц сгибателей стопы, а также произвольного подошвенного сгибания в голеностопном суставе у пациентов, перенесших инсульт. В исследовании приняли участие 51 чел, возраст которых составлял от 37 до 65 лет. Пациенты в обеих группах получали стандартную программу постинсультной реабилитации, включающую в себя 60-минутные занятия, направленные на развитие двигательных навыков, необходимых для повседневной активности, 5 дней в неделю, в течение 12 нед. Пациенты основной группы ( $n = 27$ ) в дополнение к классическим методам, получали процедуры с применением метода ФЭС, в то время как пациенты контрольной группы ( $n = 24$ ) получали только стандартную программу постинсультной реабилитации.

Анализ полученных данных выявил снижение спастичности мышц сгибателей стопы по модифицированной шкале Эшворта (*Modified Ashworth scale, MAS*) в основной группе (до – 2.9, после – 1.8;  $p < 0.05$ ), свидетельствующее о снижении спастичности на 37.5%, что значительно отличалось от показателей группы контроля (до – 2.6, после – 2.1;  $p < 0.05$ ), отражающих снижение на 21.2%. Произвольное активное разгибание стопы также показало значительное увеличение активного тыльного сгибания на 47.1% ( $p < 0.05$ ) в основной и 24.2% ( $p < 0.05$ ) и контрольной группах, соответственно. С помощью шкалы *Manual muscle test (MMT)* исследователи выявили при этом увеличение мышечной силы разгибателей стопы в основной группе на 68.7% ( $p < 0.05$ ), а в группе контроля на 27.7% ( $p < 0.05$ ). Двигательная функция нижних конечностей по шкале Фугл-Мейера улучшилась в указанных группах на 29.1% ( $p < 0.05$ ) и 11.6% ( $p < 0.05$ ) соответственно. Таким образом, исследование показало, что применение метода ФЭС совместно со стандартной реабилитацией после инсульта позволяет добиться лучшего восстановления произвольных движений в голеностопном суставе, оказывая влияние на более качественное снижение спастичности в мышцах – антагонистах подошвенных разгибателей и обеспечивая лучшее функциональное восстановление после инсульта, чем применение лишь стандартных методов двигательной реабилитации.

Существует большое количество систематических обзоров и исследований (см. приложения), посвященных данной тематике [1, 2, 4, 13–15 и др.]. В частности, в мета-анализе [16] было проанализировано 33 исследования, на основании которых группа авторов пришла к выводу, что технология ФЭС обладает потенциалом для повышения производительности походки, а также других аспек-

тов двигательного восстановления после инсульта. Тем не менее, для подтверждения этих результатов необходимы дополнительные контролируемые исследования. Исследования на здоровых людях, демонстрирующие повышение нейропластичности в ответ на стимуляцию в сочетании с произвольными движениями [17, 18], указывают на необходимость разработки систем ФЭС, которые допускают осуществление произвольного движения во время стимуляции, когда это возможно. Исходя из данных мета-анализа, наиболее используемой в исследованиях частотой стимуляции являлись показатели в диапазоне от 20 до 50 Гц. Длительность импульса при этом составляла от 280 до 400 мкс (150 мкс для имплантируемых электродов), амплитуда же, будучи приведенной только в 7 исследованиях, варьировалась от 4 (для имплантируемых электродов) и до 85 мА.

Немаловажно отметить, что методика ФЭС для восстановления функции ходьбы рекомендуется к применению для реабилитации пациентов, перенесших инсульт, в нескольких клинических руководствах [19, 20].

*Применение ФЭС при восстановлении функции руки.* Гораздо более комплексной и не менее важной является задача восстановления функции руки, напрямую связанная с качеством жизни пациентов, перенесших инсульт [1]. С целью реабилитации рук применяется весь арсенал современных реабилитационных технологий – ЛФК, робото- и механотерапия, виртуальная реальность, интерфейс мозг-компьютер. В отличие от восстановленных локомоции, базирующейся на автоматизированных, стереотипных, циклических движениях, восстановление двигательных функций руки связано с дополнительными сложностями из-за высокой вариабельности движений. Рука, как известно, является одним из самых полифункциональных органов человеческого организма и, в зависимости от профессии и индивидуальных увлечений, объем и ассортимент движений рук существенно варьируется. Одним из самых стереотипных движений является достижение удаленно расположенного объекта и его захват. Неудивительно, что именно это движение выбиралось большинством исследователей как целевое при тренировке. Наиболее выраженные двигательные нарушения в руке у пациентов, перенесших инсульт, наблюдаются в дистальных отделах. Слабость мышц, отвечающих за сгибание и разгибание пальцев, не позволяет им выполнять захват и удержание предмета в руке, в связи с чем наиболее часто выбираемыми мышцами-мишенями для ФЭС были сгибатели и разгибатели пальцев кисти.

Одними из первопроходцев в применении ФЭС для восстановления функции руки были *R. Mer-*

*letti et al.*, использовавшие разработанный 2-х канальный стимулятор, для стимуляции выбранных после ряда проведенных экспериментов мышечных мишеней: лучевого и локтевого разгибателей запястья (разгибание запястья), общего разгибателя пальцев (разгибание пальцев кисти) и трицепс (разгибание локтя). Попытка стимулировать дельтовидную мышцу для разгибания плеча была успешной только у одного пациента [21]. Для оценки эффективности технологии пациенту предлагалось выполнить определенные функциональные задачи: перемещение объектов между двумя отмеченными точками на столе. При этом было показано, что задачи успешно выполнялись во время функциональной стимуляции (хотя без стимуляции это было невыполнимым), а также после нескольких тренировок и без нее. Хотя исследование было проведено на небольшой группе больных, перенесших инсульт (8 чел.), оно послужило базой для начала внедрения ФЭС для восстановления функции верхних конечностей в реабилитационную практику. В дальнейшем сразу в нескольких исследованиях был показан более выраженный эффект ФЭС по сравнению с традиционной кинезитерапией, хотя оценка проводилась только с использованием субъективных методов по шкале Фугл-Мейера [22, 23].

В 2008 году были опубликованы результаты исследования, проведенного в Корее, показавшие, что на фоне тренировок с ФЭС у пациентов, перенесших инсульт [24] происходит реорганизация моторной коры полушарий головного мозга. Исследование было проведено на 14 пациентах, перенесших нарушение мозгового кровообращения (НМК), из которых 7 вошли в основную группу, проходившую тренировку с ФЭС и 7 – в контрольную, включавшую традиционную реабилитацию.

Двигательная парадигма фМРТ заключалась в произвольном сжимании и разжимании пальцев кисти (20 с), с последующим 20 с интервалом покоя. При этом было достоверно показано, что в основной группе, в отличие от контрольной, у пациентов 1, 2, 4, 5 во время выполнения парадигмы исчезла, а у пациента 6 уменьшилась активация ипсилатеральной сенсомоторной коры. Контралатеральная активность сенсорно-моторной коры у пациента 3 стала более фокальной. Ипсилатеральная активность премоторной коры исчезла у пациентов 1, 2, 5, 7.

Тем не менее, по данным обзора [25], в котором сопоставлялись данные исследований ФЭС с ЭМГ-триггером и циклической ФЭС, включавших всего 8 рандомизированных клинических исследований, качество данных было достаточно низким. Попытка найти статистически значимые различия в пользу ФЭС с ЭМГ-триггером в этом исследовании не удалась. Приведенные результа-

ты указывали на необходимость продолжения клинических исследований ФЭС.

В мета-анализе лаборатории *Cochrane*, посвященном методикам восстановления двигательной функции руки после инсульта, было обнаружено, что, несмотря на большое количество исследований в этой области, доказательная база ФЭС остается низкой, чему способствует большая разнородность данных по срокам после перенесенного инсульта, и не позволяющая объединить результаты большей части исследований [26].

В мета-анализе [27], посвященном изучению влияния циклической электрической стимуляции на мышечную силу у перенесших инсульт пациентов, эффект ФЭС был положительным, однако большинство из этих исследований были недостаточно объективными.

Перечисленные выше противоречия отражены в протоколах *Royal College of Physicians*, в рекомендациях 2016 г., в которых ФЭС для восстановления двигательной функции руки рекомендуется только в контексте клинических исследований и как дополнение к традиционной реабилитационной терапии [20].

В систематическом обзоре [28], посвященном применению ФЭС в качестве методики двигательного восстановления функции руки, были сформулированы замечания с указанием основных проблем исследований по данной тематике: 1) отсутствие больших рандомизированных клинических исследований; 2) большая разнородность групп пациентов (по давности перенесенного НМК от 2-х мес. до 2-х лет) и как следствие – отсутствие четких критериев, в том числе, терапевтического окна для применения ФЭС; 3) малое количество исследований с наличием группы плацебо (получающих подпороговую стимуляцию); 4) большая разнородность данных, касающихся параметров ФЭС в исследованиях, и как следствие – невозможность их стандартизации для применения в нейрореабилитации [28]. Обзор включал 20 рандомизированных клинических исследований из 135 проанализированных. Основной целью его явилось изучение влияния на бытовую активность и восстановление двигательных навыков в пораженной руке. Особенностью его является достаточно большая разнородность данных стимуляции и мышц-мишеней, выбранных исследователями для анализа. Разброс по параметрам стимуляции при этом составлял: по частоте – от 20 до 50 Гц, амплитуде тока  $\leq 70$  мА и длительности импульса от 3-х до 10 с. В качестве мышц-мишеней использовались, как правило: дельговидная, трехглавая, мышцы сгибатели и разгибатели запястья и пальцев. Все исследования включали контрольную группу, получавшую стандартную реабилитационную программу и включавшую в программу реабилитации фи-

зиотерапию, кинезитерапию и целенаправленное двигательное переобучение. В 3-х исследованиях в контрольной группе применялась также ортезотерапия, в одном – ботулотоксин, а в другом – зеркальная терапия. Только в 3-х из исследований в контрольной группе применялось плацебо в виде подпорогового импульса ФЭС. Стоит отметить, что такая разнородность данных по группе контроля, также отрицательно отражается в оценке достоверности результатов исследования, затрудняя объединение исследований в группы сравнения, хотя во всех случаях как в контрольной, так и в основной группах были эквивалентны временные параметры средней длительности тренировок, составлявшей 45 мин.

Таким образом, в заключение следует отметить, что все приведенные данные свидетельствовали о перспективности применения ФЭС в реабилитации двигательных функций верхней конечности, однако вопросы о параметрах стимуляции и тренируемых при этом движениях остаются нерешенными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор научных данных позволил сделать вывод, что значительное различие протоколов исследований, представляет определенные сложности в составлении единого мнения об эффективности технологии ФЭС. Применение ФЭС для восстановления локомоции облегчается относительно точным и простым решением использования для синхронизации импульса стимуляции с фазой шага, в виде механического датчика давления, встраиваемого в стельку обуви. На основе этой методики создан ряд коммерческих версий функциональных стимуляторов, предназначенных для адаптации и протезирования функции голеностопного сустава при периферических поражениях нервной системы, а также при поражениях головного и спинного мозга. Опыт применения ФЭС ноги при восстановлении локомоции после инсульта обладает более убедительными доказательствами, что, в первую очередь, объясняется применением в этом случае ФЭС, единой парадигмы, заключающейся в стимуляции при ходьбе мышц разгибателей голеностопного сустава.

Вместе с тем применение ФЭС в реабилитации функций руки остается затруднительным в связи с трудностями обобщения научных и клинических данных, продиктованных в первую очередь отсутствием в этом случае возможности применения единой парадигмы из-за отсутствия стереотипного и простого движения руки.

Отдельную сложность применения ФЭС мышц, как руки, так и ноги вызывает синхронизация импульсов стимуляции с каким-либо движением. Большинство коммерческих систем и ряд реби-

литационных прототипов обладают либо узкой специализацией применения, либо, напротив, представляют комплекс, слишком сложный для повседневного применения.

В качестве дальнейших направлений развития ФЭС в реабилитации можно определить возможность интеграции ФЭС с другими реабилитационными системами и тренажерами. Уже сейчас активно разрабатываются и начинают применяться системы, использующие совместно с ФЭС воображение движений и технологию мозг-компьютер интерфейс совместно с ФЭС [29, 30]. Приоритетной остается задача разработки реабилитационной системы ФЭС с “закрытым” протоколом стимуляции, который позволит использовать произвольные движения наравне с ФЭС во время целенаправленного двигательного обучения. Не менее важным является создание более точной системы синхронизации, основанной не только на данных кинематического анализа, но также использующей искусственные нейронные сети для создания библиотеки индивидуальных движений пациента.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Veerbeek J.M., Kwakkel G., van Wegen E.E.H. et al.* Early Prediction of Outcome of Activities of Daily Living After Stroke: A Systematic Review // *Stroke*. 2011. V. 42. № 5. P. 1482.
2. *Liberson W.T., Holmquest H.J., Scot D., Dow M.* Functional electrotherapy: stimulation of the peroneal nerve synchronized with the swing phase of the gait of hemiplegic patients // *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 1961. V. 42. P. 101.
3. *Liberson W.T., Offner F.F.* Method of muscular stimulation in human beings to aid in walking. US patent 3344792, Oct. 3, 1967.
4. *Moe J.H., Post H.W.* Functional electrical stimulation for ambulation in hemiplegia // *J. Lancet*. 1962. V. 82. P. 285.
5. *Crago P.E., Lan N., Veltink P.H. et al.* New control strategies for neuroprosthetic systems // *J. Rehabil. Res. Dev.* 1996. V. 33. № 2. P. 158.
6. *Chiou Y.H., Luh J.J., Chen S.C. et al.* Patient-driven loop control for hand function restoration in a non-invasive functional electrical stimulation system // *Disabil. Rehabil.* 2008. V. 30. № 19. P. 1499.
7. *Pereira S., Mehta S., McIntyre A. et al.* Functional Electrical Stimulation for Improving Gait in Persons With Chronic Stroke // *Top. Stroke Rehabil.* 2012. V. 19. № 6. P. 491.
8. *Robbins S.M., Houghton P.E., Woodbury M.G., Brown J.L.* The therapeutic effect of functional and transcutaneous electric stimulation on improving gait speed in stroke patients: a meta-analysis // *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 2006. V. 87. № 6. P. 853.
9. *Roche A., Laighin G.Ó., Coote S.* Surface-applied functional electrical stimulation for orthotic and therapeutic treatment of drop-foot after stroke – a systematic review // *Phys. Ther. Rev. Centre for Reviews and Dissemination (UK)*. 2009. V. 14. № 2. P. 63.
10. *Yan T., Hui-Chan C.W.Y., Li L.S.W.* Functional electrical stimulation improves motor recovery of the lower extremity and walking ability of subjects with first acute stroke: A randomized placebo-controlled trial // *Stroke*. 2005. V. 36. № 1. P. 80.
11. *Embrey D.G., Holtz S.L., Alon G. et al.* Functional Electrical Stimulation to Dorsiflexors and Plantar Flexors During Gait to Improve Walking in Adults With Chronic Hemiplegia // *Arch. Phys. Med. Rehabil. Appleton & Lange, Norwalk*. 2010. V. 91. № 5. P. 687.
12. *Sabut S.K., Sikdar C., Kumar R., Mahadevappa M.* Functional electrical stimulation of dorsiflexor muscle: effects on dorsiflexor strength, plantarflexor spasticity, and motor recovery in stroke patients // *NeuroRehabilitation*. 2011. V. 29. № 4. P. 393.
13. *Витензон А.С.* Достижения и перспективы развития метода искусственной коррекции движений при патологической ходьбе // Протезирование и протезостроение. Сб. Трудов ЦНИИПП. 2000. № 96. С. 5.
14. *Даминов В.Д., Уварова О.А., Зимица Е.В. Кузнецов А.Н.* Функциональная электростимуляция локомоторного аппарата в клинической нейрореабилитации // Сб. трудов “Высокотехнологичное оборудование и методы его применения в нейрореабилитации”. 2010. С. 283.
15. *Колодезникова А.А., Чурилов С.Н., Иванова Г.Е. и др.* Функциональная электростимуляция с БОС (биологическая обратная связь) в программе восстановления функции верхней конечности в острый период церебрального инсульта // Вестник восстановительной медицины. 2011. Т. 4. С. 10.
16. *Kafri M., Laufer Y.* Therapeutic Effects of Functional Electrical Stimulation on Gait in Individuals Post-Stroke // *Ann. Biomed. Eng. Springer US*. 2015. V. 43. № 2. P. 451.
17. *Jochumsen M., Niazi I.K., Signal N. et al.* Pairing Voluntary Movement and Muscle-Located Electrical Stimulation Increases Cortical Excitability // *Front. Hum. Neurosci.* 2016. V. 10. P. 1.
18. *Meesen R.L.J., Cuypers K., Rothwell J.C. et al.* The effect of long-term TENS on persistent neuroplastic changes in the human cerebral cortex // *Hum. Brain Mapp.* 2011. V. 32. № 6. P. 872.
19. National Institute for Health and Clinical Excellence. Functional electrical stimulation for foot drop of central neurological origin. NICE, 2009.
20. Royal College of Physicians. National clinical guideline for stroke. 5th Edition. 2016. P. 151.
21. *Merletti R., Acimovic R., Grobelnik S., Cvilak G.* Electrophysiological orthosis for the upper extremity in hemiplegia: feasibility study // *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 1975. V. 56. № 12. P. 507.
22. *Chae J., Bethoux F., Bohine T. et al.* Neuromuscular stimulation for upper extremity motor and functional recovery in acute hemiplegia // *Stroke*. 1998. V. 29. № 5. P. 975.

23. Feys H.M., De Weerdt W.J., Selz B.E. et al. Effect of a therapeutic intervention for the hemiplegic upper limb in the acute phase after stroke: a single-blind, randomized, controlled multicenter trial // *Stroke*. 1998. V. 29. № 4. P. 785.
24. Shin H.K., Cho S.H., Jeon H. et al. Cortical effect and functional recovery by the electromyography-triggered neuromuscular stimulation in chronic stroke patients // *Neurosci. Lett.* 2008. V. 442. № 3. P. 174.
25. Meilink A., Hemmen B., Seelen H., Kwakkel G. Impact of EMG-triggered neuromuscular stimulation of the wrist and finger extensors of the paretic hand after stroke: a systematic review of the literature // *Clin. Rehabil.* 2008. V. 22. № 4. P. 291.
26. Pollock A., Farmer S.E., Brady M.C. et al. Interventions for improving upper limb function after stroke // *Cochrane Database of Systematic Reviews*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. 2014. № 11. P. CD010820.
27. Nascimento L.R., Michaelsen S.M., Ada L. et al. Cyclical electrical stimulation increases strength and improves activity after stroke: a systematic review // *J. Physiother.* 2014. V. 60. № 1. P. 22.
28. Eraifej J., Clark W., France B. et al. Effectiveness of upper limb functional electrical stimulation after stroke for the improvement of activities of daily living and motor function: a systematic review and meta-analysis // *Syst. Rev. BioMed Central*. 2017. V. 6. № 1. P. 40.
29. Irimia D., Sabathiel N., Ortner R. et al. RecoveriX: A new BCI-based technology for persons with stroke // *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS. IEEE*, 2016. P. 1504.
30. Cho W., Sabathiel N., Ortner R. et al. Paired Associative Stimulation Using Brain-Computer Interfaces for Stroke Rehabilitation: A Pilot Study // *Eur. J. Transl. Myol. PAGEPress*. 2016. V. 26. № 3. P. 6132.

## Modern Technologies of Functional Electrical Stimulation Used for Central Paresis Rehabilitation

A. S. Klochkov<sup>a,\*</sup>, A. E. Khizhnikova<sup>a</sup>, A. M. Kotov-Smolenskiy<sup>a</sup>, L. A. Chernikova<sup>a</sup>,  
N. A. Suponeva<sup>a</sup>, and M. A. Piradov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Research Center of Neurology, Moscow, Russia

\*E-mail: Anton.s.klochkov@gmail.com

Motor rehabilitation is one of the main tasks in the restoration of individual independence in stroke patients. Neuromuscular electrostimulation synchronized with the performance of a motor task, known as functional electrostimulation (FES), is a reliable and widely used method. During more than 40 years of studies on FES, the safety principles have been settled, as well as methods for increasing the strength of affected muscles. In this review we discussed the latest FES technologies, recent clinical and basic studies and the prospects and directions for further research.

*Keywords:* functional electrical stimulation, stroke, hemiparesis, gait, rehabilitation, assistive technologies.