

**В. И. ДОЦЕНКО, Н. Ю. ТИТАРЕНКО**

ФГБУН ГНЦ РФ «Институт медико-биологических проблем РАН», Москва  
ООО Научно-медицинская фирма «Статокин», Москва

# Объективные инструментальные критерии оценки эффективности функциональной программируемой электромиостимуляции в ходьбе у больных с ортопедо-неврологической патологией

Доценко Владимир Иванович  
генеральный директор ООО НМФ «Статокин»  
E-mail: statokyn@aha.ru

**Резюме.** Проведено биомеханическое обследование и лечение методом функциональной программируемой электростимуляции (ФПЭС) мышц в процессе ходьбы 61 ребёнка с детским церебральным параличом (ДЦП) в форме спастической диплегии в возрасте от 4 до 17 лет и 55 детей в возрасте от 7 до 15 лет с начальными формами сколиоза (1–2-й ст.). Объективизацию эффектов лечения проводили при помощи электронейромиографии (регистрация и анализ параметров Н-рефлекса), а также при оценке кинематических параметров шага и статических показателей позвоночника с использованием метода компьютерного видеоанализа движений. По завершении курса лечения методом ФПЭС у больных ДЦП по данным анализа параметров Н-рефлекса наблюдалось снижение возбудимости на соответствующих сегментах спинного мозга. Уменьшение средней вариативности значений гониометрического профиля после курса лечения расценивали как проявления стабилизации навыка ходьбы, снижения её энергоёмкости и улучшения статокинетической устойчивости. Также у больных сколиотической болезнью по завершении лечения наблюдалась отчётливая коррекция общего угла искривления позвоночника, уменьшение амплитуды вращательных движений таза и плечевого пояса, улучшение работы мышц в цикле шага с появлением чётких максимумов их электрической активности, а также улучшение параметров кинематики шага.

**Ключевые слова:** функциональная электростимуляция мышц, детский церебральный паралич, сколиотическая болезнь, электронейромиография, Н-рефлекс, биомеханика, видеоанализ движений, гониометрический профиль, вариативность параметров шага, энергозатраты при ходьбе.

**V. I. DOTSSENKO, N. YU. TITARENKO**

FPFIS SSC RF «Institute for biomedical problems of the Russian Academy of Sciences», Moscow  
Scientific-medical company Statokyn LLC, Moscow

# Objective tool criteria assessment of the efficiency of the functional programmable electric imasinsances in walk in patients with orthopedic-neurological pathology

Vladimir I. Dotsenko  
general director of Scientific-medical company Statokyn LLC  
E-mail: statokyn@aha.ru

**Summary.** Biomechanical examination and treatment using functional programmed electrical stimulation (FPES) of the muscles in the process of walking 61 children with cerebral palsy (ICP) in the form of spastic diplegia aged 4 to 17 years and 55 children aged 7 to 15 years with the initial forms of scoliosis (1-2 art.). Objectification of treatment effects was carried out using electroneuromyography (recording and analysis of the parameters of the H-reflex), as well as in assessing the kinematic parameters of the step and static indicators of the spine using the method of computerized video analysis of movements. Upon completion of the course of treatment with FPES in patients with cerebral palsy, according to the analysis of the parameters of the H-reflex, a decrease in excitability was observed in the corresponding segments of the spinal cord. The decrease in the mean variability of the values of the goniometric profile after the course of treatment was regarded as manifestations of stabilization of the skill of walking, reducing its energy intensity and improving the statokinetic stability. Also, patients with scoliotic disease at the end of treatment showed a clear correction of the total angle of curvature of the spine, a decrease in the amplitude of rotational movements of the pelvis and shoulder girdle, an improvement in muscle work in the step cycle with the appearance of clear maxima of their electrical activity, and an improvement in the kinematics of step parameters.

**Key words:** functional electrical stimulation of the muscles, cerebral palsy, scoliotic disease, electroneuromyography, H-reflex, biomechanics, video analysis of movements, goniometric profile, variability of the parameters of the step, energy consumption during walking.



## Введение

Функциональная программируемая электростимуляция (ФПЭС) мышц, осуществляемая во время двигательного акта ходьбы или других циклических, стереотипных двигательных актов (бега, занятий на велотренажёре или беговой дорожке, при имитирующих греблю движениях верхних конечностей и др.), служит наглядным представителем обширного класса методов так называемой сенсорной терапии.

Традиционно применяемая в восстановительной медицине электростимуляция покоя протекает в условиях, далёких от реального функционирования мышц. Этот метод электромиостимуляции не связан с координацией двигательного акта, а значит, не может влиять ни на коррекцию, ни на выработку нового двигательного стереотипа и реализует свои эффекты исключительно на уровне периферического мышечного звена.

Напротив, восстановительное лечение двигательных нарушений методом ФПЭС моделирует выработанную в эволюции пространственно-временную организацию мышечной активности. Данная особенность является предпосылкой формирования и закрепления физиологичных паттернов движений на уровне спинального генератора локомоций, а также в стволовых и полушарных центрах моторного контроля, что детерминирует стойкость достигнутой функциональной перестройки.

Нейрофизиологическая сущность метода ФПЭС заключается в точном временном соответствии программ искусственного (посредством электростимуляции) и естественного (при попытке произвольного усилия) возбуждения мышцы в двигательных актах человека. Электростимуляция мышцы во время локомоции происходит в точном соответствии с естественным возбуждением и сокращением мышц на протяжении двигательного акта. Это представляется очень важным – ведь только в фазы естественного (произвольного) возбуждения мышц локомоторные центры всех вертикальных уровней ЦНС восприимчивы к внешним афферентным сигналам (в данном случае к электростимуляции мышц), следовательно, эти локомоторные центры становятся доступными для коррекции своей деятельности. В остальные фазы шагового цикла локомоторные центры заторможены, а их работа практически не поддаётся коррекции в силу того, что афферентный приток в эти фазы шага заблокирован пресинаптическим торможением (К. В. Баев, 1984; А. С. Витензон, 1982).

Метод ФПЭС удачно совмещает свойства трёх глобальных стратегий клинической реабилитологии – лечебной физкультуры (кинезитерапии), аппаратной физиотерапии и функционального ортезирования (А. С. Витензон, 1998; А. С. Витензон и соавт., 1999). В большей степени этот метод лечения следует относить к кинезитерапии.

## Материал и методы

В настоящей работе проанализированы результаты клинко-инструментального обследования и лечения методом ФПЭС 61 больного детским церебральным параличом (ДЦП) в форме спастической диплегии в возрасте 4–17 лет, а также 55 детей в возрасте 7–15 лет с начальными формами сколиоза (1–2-й ст.). Обследовано 12 здоровых детей того же возраста с целью получения данных средней детской нормы. В группе больных сколиозом первично обследованные и получившие курс ФПЭС – 35 больных; 10 пациентов лечились методом ФПЭС повторно; 10 пациентов, в качестве основной терапии получившие курс электростимуляции мышц в покое при помощи аппарата «Стимул-1», составили контрольную группу. В зависимости от клинической формы заболевания пациенты, обследованные первично, были разделены на две группы: первая – больные S-образным сколиозом – 14 человек (40 %), вторая – C-образной формой – 21 человек (60 %).

В нашей клинической практике для проведения курсового лечения методом ФПЭС используется **Комплекс аппаратно-программный многоканальный программируемой электростимуляции мышц низкочастотным импульсным током «АКорД»** (разработка и производство Научно-медицинской фирмы «Статокин», Россия).

Комплекс имеет регистрационное удостоверение на медицинское изделие Росздравнадзора № ФСР 2008/03709 от 28 октября 2013 г. Ведущие отличительные особенности комплекса подкреплены Патентом РФ на изобретение № 2241500 с приоритетом от 01.08.2003 г. «Устройство для лечения поражений опорно-двигательного аппарата» (В. И. Доценко и соавт., 2004).

Комплекс ФПЭС представляет собой источник низкочастотных биполярных импульсов тока. В его состав входят интерфейсный блок; микропроцессорный переносной многоканальный электростимулятор, закрепляемый на пояс пациента; прецизионные датчики синхросигналов – значений углов в суставах (гониометр) и стопный тензодатчик; коммуникационные и соединительные кабели; комплект гидрофильных электродов из современных синтетических материалов и их эластичных фиксаторов на мышцах пациента. Управление комплексом ФПЭС осуществляется от ПЭВМ с использованием оригинального программного обеспечения, созданного в операционной среде Windows.

Каким образом при использовании компьютерных комплексов ФПЭС удаётся осуществить точную и корректную синхронизацию произвольного напряжения той или иной мышцы в двигательном акте и наслаиваемой на неё электрической стимуляции? Ответ прост. По своим биомеханическим характеристикам ходьба за годы эволюции вертикального перемещения человека в гравитационном поле Земли приобрела свойства *высокостереотипного двигательного акта с минимизированным разбросом (низкой вариативностью) параметров шага*. В полной мере это положение относится и к циклическому, стереотипному включению конкретных мышц в обеспечение ходьбы. Во вполне определённый момент двойного шагового цикла конкретным значениям углов в суставах нижних конечностей, а также биомеханическим параметрам контакта стопы с опорой (т. е. фазам переката стопы от пятки к носку) соответствует чёткий паттерн напряжения и расслабления всей совокупности мышц нижних конечностей, таза и спины. Эта «мозаика» мышечной активности во время шага – *мышечный профиль* однозначно соотносится с текущим значением суставных углов – *гониометрическим профилем*.

С учётом вышесказанного относительное (процентное) распределение мышечной активности в период двойного шага и её соотношение с гониометрическим профилем можно принять за некую константу, используемую при подстройке фаз мышечной электростимуляции в процессе активного передвижения пациента. Следовательно, аппаратно-программный модуль временной синхронизации электромиостимуляции с фазами шага, использующий для синхронизации измеряемые в формате online и управляющие стимулятором опорные (подометрические) или гониометрические параметры каждого шагового цикла, является ключевым в работе комплекса ФПЭС.

Для верификации позитивных эффектов ФПЭС, наряду с классической электромиографией, в соответствии с современным стандартом биомеханических исследований применяли бесконтактный **компьютерный видеонализ движений** с использованием оптических методов т. н. захвата движения (motion capture) и анализом показателей угловой и линейной кинематики произвольной ходьбы пациентов. Бесспорным преимуществом методов видеонализа движений перед методами контактной биомеханики является отсутствие на теле пациента каких-либо датчиков и кабелей, в значительной степени ограничива-

ющих свободное поведение человека и искажающих его естественный двигательный стереотип – приближенный к норме или патологический. Использовали отечественный комплекс «**Видеоанализ движений**» (разработка и производство НМФ «Статокин», Россия). В некоторых случаях проводили обследование методом компьютерной статокинезиметрии (стабилометрии).

Следует отметить, что исследование качественных и количественных показателей поддержания вертикальной позы методом компьютерной статокинезиметрии и характеристик угловой и линейной кинематики произвольной ходьбы пациентов методом компьютерного видеоанализа движений (motion capture) выступает ведущим инструментальным подходом в оценке таких базисных гравитозависимых процессов жизнедеятельности человека, как протекающие в неразрывном единстве статика и локомоция.

### Результаты и обсуждение

При анализе результатов лечения исходили из теоретических представлений о том, что оптимальное выполнение циклических, многократно повторяемых движений, к которым, в первую очередь, относится произвольная ходьба, осуществляется с минимальной вариативностью биомеханических показателей двойного шагового цикла. Данная особенность закреплена в эволюции перехода к бипедалной локомоции в условиях действия сил земной гравитации и имеет глубинный биологический смысл – минимизировать энергозатраты человека при ходьбе. Прогрессивное уменьшение в процессе восстановительного лечения показателей вариативности основных параметров шага служит объективным и надёжным критерием эффективности реабилитации больных.

В группе больных ДЦП обнаружена следующая динамика. Ведущим показателем устойчивости и оптимальности энергозатрат во время ходьбы является соотношение продолжительности фаз переноса и опоры двойного шага. В норме оно составляет 40 и 60 %, в группе больных спастической диплегией до курса лечения – 25 и 75 %, по его завершении наблюдалось значительное приближение к нормальным показателям – 33 и 67 %. Другой важный показатель – соотношение одно- и двухопорного периода. В норме – 73 и 27 %, до курса лечения – 54 и 46 %, по его завершении – 63 и 37 %. Изменения статистически достоверны.

Проанализирована динамика средних коэффициентов вариации значений суставного угла (т. н. гониометрического профиля) в исследуемых временных точках траектории тазобедренного, коленного и голеностопного суставов. Тазобедренный сустав –  $3,68 \pm 1,13$  % и  $1,93 \pm 1,08$  % до и после лечения соответственно; аналогичные значения для коленного сустава –  $3,85 \pm 1,19$  % и  $1,82 \pm 1,12$  %; для голеностопного сустава –  $4,47 \pm 1,23$  % и  $2,01 \pm 0,91$  %. Различия достоверны при  $p \leq 0,05$ .

Уменьшение средней вариативности значений гониометрического профиля после курса лечения следует расценивать как проявления стабилизации навыка ходьбы, снижения её энергоёмкости и улучшения статокинетической устойчивости.

Оценка показателей Н-рефлекса выявила снижение отношения максимальных амплитуд Н-рефлекса и М-ответа с  $65,1 \pm 14,3$  % до  $56,5 \pm 15,3$  % после курса лечения, указывающее на уменьшение числа единиц мотонейронного пула, вовлечённых в рефлекторную реакцию, что отражало некоторое снижение возбудимости на соответствующих сегментах спинного мозга. Степень депрессии Н-рефлекса при низкочастотной ритмической стимуляции (3 Гц) увеличивалась с  $10,2 \pm 14,1$  % до  $17,3 \pm 21,2$  %.

В профессиональном восприятии врачей метод ФПЭС ассоциируется преимущественно с коррекцией макродвижений туловища и конечностей у больных ДЦП, с пост-

инсультными двигательными нарушениями, с последствиями травм головного и спинного мозга. Однако опыт последних лет демонстрирует высокую эффективность метода ФПЭС в лечении нарушений осанки у детей и подростков, при широко распространённых в детской популяции сколиотических деформациях позвоночника.

С учётом самоподдерживающихся патогенетических факторов этих деформаций и тенденции к прогрессированию процесса следует говорить о течении «сколиотической болезни», требующей высокотехнологичных видов медицинской помощи. Представим клинические результаты лечения в этой группе пациентов.

При подборе силы тока стимуляции добивались видимых эффектов сокращения мышц: при стимуляции трапецевидной и ромбовидной группы мышц надплечье поднималось вверх, а лопатка отводилась назад; при стимуляции крестцовоостистых и интеркостальных мышц туловище отклонялось в сторону возбуждения. Более интенсивной стимуляции подвергались мышцы на выпуклой стороне искривления.

Оценка результатов ФПЭС у больных сколиотической болезнью показала:

А. Статическая составляющая видеоанализа движений в режиме кифосколиозографии (аналог компьютерной оптической топографии позвоночника):

1) В группе больных S-образным сколиозом увеличилась максимальная электрическая активность мышц в 1,5 раза. Коррекция общего угла искривления составила 23 %, или  $4,6^\circ$  в сторону уменьшения деформации. Амплитуда вращательных движений таза в среднем уменьшилась на 25,3 %, плечевого пояса – на 28,3 %. Произошло улучшение работы мышц в цикле шага: появились чёткие максимумы электрической активности мышц, оптимизировались временные рамки работы мышц, включение мышц туловища в движение в результате применения ФПЭС стало более симметричным.

2) В группе больных S-образным сколиозом были отмечены аналогичные изменения клинического течения заболевания, а также иннервационной и биомеханической структуры ходьбы пациентов.

3) В контрольной группе результаты лечения оказались менее убедительными: после проведения курса электростимуляции мышц в покое коррекция общего угла искривления составила  $1,0^\circ$ , максимальная электрическая активность увеличилась всего на 4 %. Амплитуда вращательных движений таза и верхнего плечевого пояса уменьшилась на 10,7 и 10,3 % соответственно. В иннервационной структуре ходьбы изменений не произошло.

Б. Динамическая составляющая видеоанализа движений в режиме кинематического анализа локомоций:

На фоне курсового лечения методом ФПЭС в обеих группах пациентов со сколиотической болезнью с разным типом искривления позвоночника при помощи оптических методов компьютерного видеоанализа движений продемонстрирована положительная динамика ходьбы. Так же, как и в группе больных ДЦП, оценивались ведущие показатели угловой и линейной кинематики локомоций пациентов со сколиотической болезнью – скорость, ускорение, текущие значения суставных углов в структуре двойного шагового цикла. В обеих группах подтверждено достоверное приближение гониометрического профиля суставов нижних конечностей к нормативному «коридору» указанных кинематических параметров, принимаемых за эталон сравнения.

Изучение отдалённых результатов лечения показало: эффективность метода ФПЭС сохраняется в течение 6–18 месяцев после одного курса стимуляции. При этом повторные курсы ФПЭС, проведённые через 6–12 месяцев, позволяют не только добиться поддержания лечебного



эффекта, но и увеличить возможности дальнейшей коррекции деформации позвоночника.

ФПЭС предусматривает решение трёх задач: укрепление ослабленных мышц, коррекцию неправильно выполняемых движений, выработку и поддержание приближающегося к норме двигательного стереотипа ходьбы. Иными словами, перечисление этих трёх задач высвечивает три мишени, на которые содружественно проецируется действие метода ФПЭС:

а) первичное исполнительное звено движения, периферический нейромоторный аппарат, на который оказывает позитивные эффекты силовое воздействие ФПЭС, общие с эффектами классической электростимуляции покая;

б) текущее, во время сеанса лечения, исправление кинематических и динамических характеристик шага (т. н. функциональное ортезирование) – задействуется истинный биомеханический уровень исполнения движения;

в) воздействие на нейродинамику пациента, закрепление правильного двигательного стереотипа ходьбы на уровне локомоторных центров головного и спинного мозга, оптимизация межмышечных координаций.

Этим триединством и объясняется качественный скачок клинической эффективности метода ФПЭС по сравне-

нию с некоторыми другими стимуляционными и кинезитерапевтическими технологиями.

#### Литература

1. Баев К. В. Нейронные механизмы программирования спинным мозгом ритмических движений. Киев: Наукова Думка, 1984. 156 с.

2. Витензон А. С., Миронов Е. М., Петрушанская К. А., Скоблин А. А. Искусственная коррекция движений при патологической ходьбе. М., 1999. 504 с.

3. Витензон А. С., Петрушанская К. А. От естественного к искусственному управлению локомоцией. М., 2003. 440 с.

4. Доценко В. И., Есютин А. А., Марков А. А., Чугунов В. В. Устройство для лечения поражений опорно-двигательного аппарата: Патент РФ на изобретение № 2241500 с приоритетом от 01.08.2003 г. М., 2004.

5. Кочетков А. В., Доценко В. И., Куренков А. Л. Ремоделирование движений у больных с помощью электростимуляции мышц // Современные медицинские технологии. 2011. № 7. С. 45–50.

6. Титаренко Н. Ю., Воронов А. В., Доценко В. И. и соавт. Компьютерный видеоанализ движений в оценке восстановительного лечения детей с резидуальным нейромоторным дефицитом // Функциональная диагностика. 2006. № 3. С. 69–75