

УДК 51-76; 612.741.1; 612.76; 615.841

**МЕТОД И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЯЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ  
ДВИГАТЕЛЬНОГО НАВЫКА ЧЕЛОВЕКА  
НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ**

*Н.С. ДАВЫДОВА, канд. техн. наук, доц. А.Н. ОСИПОВ,  
канд. техн. наук, доц. М.В. ДАВЫДОВ, М.М. МЕЖЕННАЯ*  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

*Исследуется проблема формирования у человека двигательного навыка с заданными параметрами, а также коррекции уже сформированного двигательного стереотипа в соответствии с требуемой структурой движения. Проанализированы физиологические механизмы организации и управления движениями в организме человека. Предложен метод управляемого изменения двигательного навыка человека на основе многоканальной электростимуляции, программа которой разрабатывается индивидуально и соответствует особенностям функциональной структуры движения человека и его двигательным способностям. Рассмотрена техническая система многоканальной электростимуляции с программным управлением параметрами стимулирующих сигналов и временной последовательностью их следования в соответствии с необходимой структурой формируемого или корректируемого двигательного навыка.*

**Введение.** Во всех сферах своей деятельности человек сталкивается с необходимостью выполнения разных, порой довольно сложных, двигательных действий, которые представляют собой результат согласованной работы различных систем организма. Неоднократное выполнение одних и тех же действий (обучение) приводит к формированию двигательного навыка, т.е. к формированию новых нейронных связей, лежащих в основе программ конкретных двигательных актов [1].

Актуальной задачей для медицины, спорта, профессионально-трудовой деятельности является проблема формирования у человека двигательного навыка, соответствующего заранее заданным параметрам, а также коррекция уже сформированного двигательного стереотипа в соответствии с целевой функцией. Для решения данной задачи необходимо разработать методы управляемого изменения двигательного навыка. Возможность управляемого изменения двигательного навыка человека базируется на теории организации управления движениями в организме и теории функциональных систем [2; 3]. В общем случае управление движениями в организме человека основано на формировании в центральной нервной системе двигательных программ и их передаче по эфферентным путям к исполнительным органам – мышцам, отвечающим на поступление к ним нервных импульсов реакцией возбуждения, проявляющейся в виде механических и электрических феноменов. Одновременно в течение всего времени выполнения мышечной работы центральная нервная система получает сигналы обратной связи от мышц, других органов и систем организма, а также информацию об окружающей обстановке (через визуальные, звуковые анализаторы, вестибулярный аппарат и др.), на основании которых, при необходимости, происходит внесение коррекций в программу двигательного акта [4]. Так как на процесс выполнения движения существенное влияние оказывают сигналы обратной связи, соответственно, внешнее управление последними позволит формировать (или корректировать) двигательный навык человека в соответствии с требуемой структурой движения [5].

В представленной работе для управляемого изменения двигательного навыка человека предлагается многоканальная электростимуляция. Многоканальная электростимуляция позволяет искусственно моделировать работу мышечных групп человека в соответствии с заданным (эталонным) образом движения [6]. Однако программа электростимуляции должна отвечать индивидуальным особенностям функциональной структуры движения человека и его двигательным способностям. Это служит предпосылкой для формирования и закрепления физиологических паттернов движения в мозговых структурах управления двигательной деятельностью в соответствии с заданной индивидуальной программой [7]. Цель работы – разработка метода и технических средств управляемого изменения двигательного навыка человека на основе многоканальной электростимуляции. При этом программа многоканальной электростимуляции должна разрабатываться индивидуально для каждого исследуемого в соответствии с его двигательными способностями и уже сформированным двигательным стереотипом.

**Основная часть.** Для функциональной диагностики двигательных способностей человека и оценки уже сформированного двигательного стереотипа предлагается комплексный анализ пространственно-временной и иннервационной структуры движения. Так как любой двигательный навык имеет постоянный рисунок возбуждения мышц [8], возможно построение иннервационной структуры движения, которая представляет собой устойчивые сочетания активности мышц, используемые в конкретном движении. Анализ работы мышц при совершении двигательного акта осуществляется с помощью многоканальной интерференционной электромиографии (ЭМГ), которая позволяет исследовать биоэлектрическую активность заданного количества мышц одновременно [9]. В свою очередь пространственно-временная струк-

тура движения позволяет разбивать исследуемую двигательную деятельность на отдельные фазы и далее исследовать её не целиком, а по частям. В зависимости от типа исследуемого движения в качестве методов построения такой структуры двигательного упражнения могут быть использованы как видеосъемка, так и подография (ПДГ). Подография (регистрация моментов отрыва и касания различных отделов стопы с опорой) позволяет построить пространственно-временную структуру для упражнений, связанных с такими локомоциями, как ходьба, бег, прыжки. Видеосъемка, хотя и является менее точным методом (обладает меньшим разрешением по времени), позволяет представить информацию в наглядной форме. Такая совокупность временных, пространственных и амплитудных электромиографических характеристик получила название электромиографического портрета движения [6; 10].

Разработана методика и программно-технические средства для исследования иннервационной и пространственно-временной структуры движения на основе многоканальной электромиографии и подографии [11]. Методика включает: *синхронную регистрацию* заданного количества каналов электромиограммы (выбираются мышцы, преимущественно обеспечивающие исследуемую двигательную деятельность) и четырех каналов подограммы (регистрируются моменты отрыва и касания отдельно пятки и носка каждой ноги); *цифровую обработку* полученных сигналов ЭМГ и ПДГ и *построение* электромиографического портрета движения; *анализ* электромиографического портрета движения, который сводится к рассмотрению энергетического вклада каждой мышцы в формирование движения и оценке характера распределения усилий работающих мышц по фазам движения; *вычисление общих динамических характеристик* движения [12].

На рисунке 1, а показан пример ЭМГ портрета движения «прыжок вверх с места». На рисунке представлены нормированные электромиограммы мышц Rectus Femoris, Biceps Femoris, Gastrocnemius и Soleus правой ноги, а также показаны маркеры границ фаз движения, соответствующих временным моментам: «начало движения», «отрыв пятки», «отрыв носка», «касание носка», «касание пятки» и «конец движения». Для указанного движения выделены следующие фазы: фаза подседа (1) – от начала движения до отрыва пятки; фаза толчка (2) – от момента отрыва пятки до момента отрыва носка; фаза полета (3) – от момента отрыва носка до момента касания носка; фаза приземления (4) – от момента касания носка до момента касания пятки; фаза подъема (5) – от момента касания пятки до конца движения. На рисунке 1, б представлены кадры синхронной видеосъемки, соответствующие выделенным фазам движения.

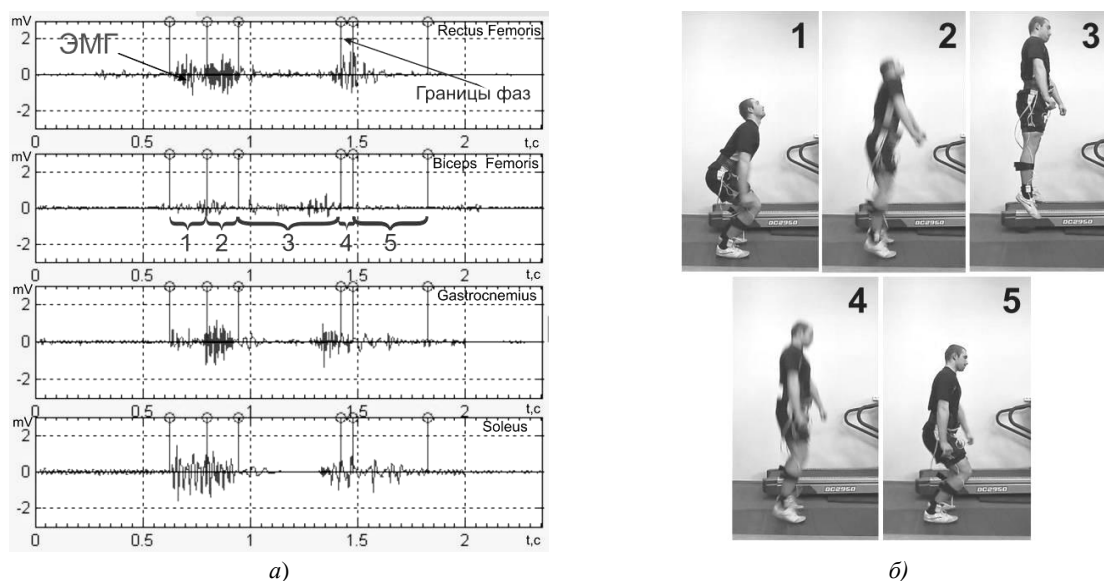


Рис. 1. Пример ЭМГ портрета движения «прыжок вверх с места» (а); кадры синхронной видеосъемки, соответствующие выделенным фазам движения (б): 1 – фаза подседа; 2 – фаза толчка; 3 – фаза полета; 4 – фаза приземления; 5 – фаза подъема

Разработка программы многоканальной электростимуляции осуществляется индивидуально на базе построенного ЭМГ портрета исследуемого движения по следующему алгоритму:

1. *Построение графика энергии ЭМГ и вычисление суммарной энергии ЭМГ для каждой мышцы* (рис. 2, б). График энергии ЭМГ каждой мышцы строится исходя из выражения:

$$E_{ЭМГ}^i = \frac{(x_i)^2}{n} \text{ (мВ}^2\text{)}, \quad (1)$$

где  $E_{ЭМГ}^i$  –  $i$ -й дискретный отсчет сигнала энергии ЭМГ;  $x_i$  – амплитуда  $i$ -го дискретного отсчета сигнала ЭМГ;  $n$  – количество дискретных отсчетов.

Суммарная энергия ЭМГ каждой мышцы:

$$E_{\text{ЭМГ}} = \sum_{i=1}^n E_{\text{ЭМГ}}^i \quad (\text{мВ}^2), \quad (2)$$

где  $E_{\text{ЭМГ}}^i$  –  $i$ -й дискретный отсчет сигнала энергии ЭМГ;  $n$  – число дискретных отсчетов ЭМГ.

2. Построение огибающей энергии ЭМГ для каждой мышцы (рис. 2, в). Построение огибающей энергии ЭМГ осуществляется с помощью динамических окон, содержащих заданное пользователем число дискретных отсчетов (точек), и сдвигаемых по интерполируемому сигналу. Для каждого окна находится максимальная по амплитуде выборка сигнала и запоминается ее номер. Построение огибающей энергии ЭМГ осуществляется путем восстановления во времени найденных выборок исходного сигнала.

3. Выделение значащих временных интервалов сосредоточения энергии ЭМГ для каждой мышцы (рис. 2, г). Для корректного выбора времени стимуляции в соответствии с фазами исследуемого движения и интервалами сосредоточения энергии ЭМГ определяются значащие временные интервалы сигнала ЭМГ ( $T_{\text{знач}}$ ), на которых сосредоточено более  $k$  % (предусмотрена возможность интерактивного изменения границы) от суммарной энергии ЭМГ сигнала. Для этого сигнал энергии ЭМГ делится на временные интервалы, границами которых являются локальные минимумы огибающей энергии ЭМГ. Критерий значимости выделенных временных интервалов:

$$E_{T_{\text{знач}}} \geq k \cdot E_{\text{ЭМГ}}, \quad (3)$$

где  $E_{T_{\text{знач}}}$  – энергия ЭМГ, сосредоточенная в интервале  $T_{\text{знач}}$ ;  $k$  – граница значимости ( $0 \dots 1$ ), задаваемая как доля от суммарной энергии ЭМГ;  $E_{\text{ЭМГ}}$  – суммарная энергия ЭМГ.

Граница значимости  $k$  выбирается с позиции соответствия значащих временных интервалов сосредоточения энергии ЭМГ фазам исследуемого движения;

4. Определение окон стимуляции для каждой мышцы (рис. 2, д). Для каждой мышцы на значащих временных интервалах сосредоточения энергии ЭМГ рассчитываются окна стимуляции. Критерий для определения ширины окон стимуляции – сосредоточение в окне более 90 % от  $E_{T_{\text{знач}}}$  (суммарной энергии ЭМГ в рассматриваемом временном интервале  $T_{\text{знач}}$ ):

$$E_{\text{стим}} \geq 0,9 E_{T_{\text{знач}}}, \quad (4)$$

где  $E_{\text{стим}}$  – энергия ЭМГ, сосредоточенная в окне стимуляции;  $E_{T_{\text{знач}}}$  – энергия ЭМГ, сосредоточенная в интервале  $T_{\text{знач}}$ .

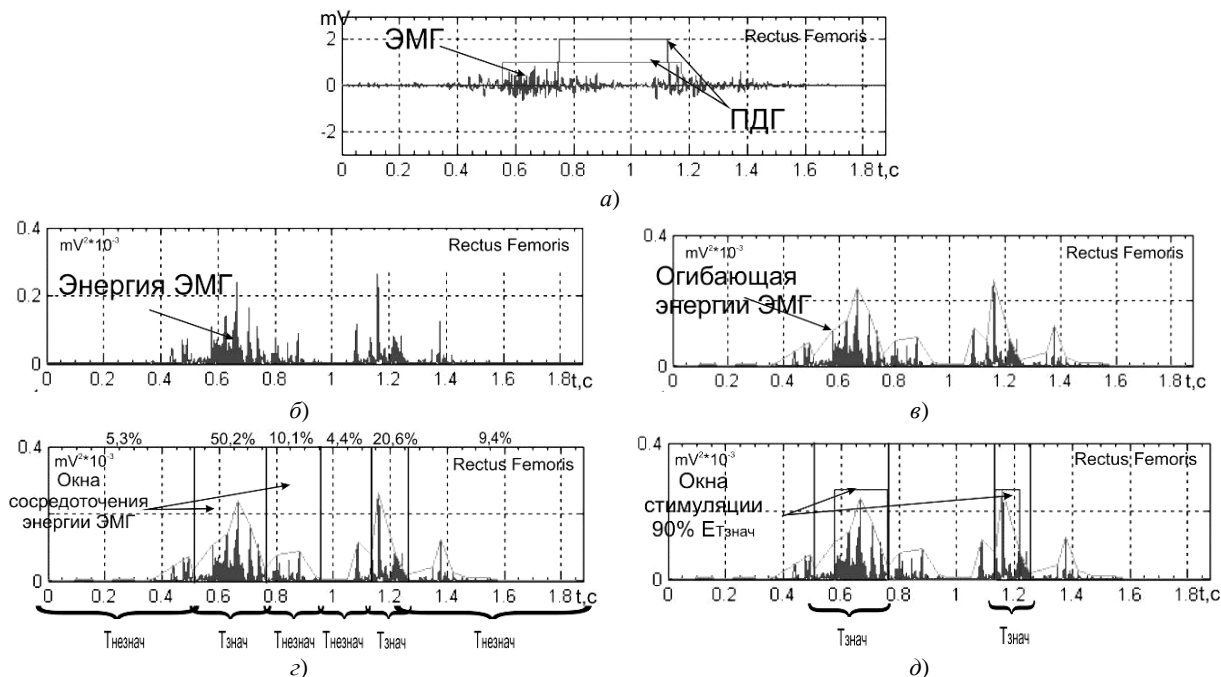


Рис. 2. Пример поэтапного построения индивидуальной программы электростимуляции мышцы Rectus Femoris для движения «прыжок вверх с места»: а – электромиограмма мышцы и подограмма правой ноги; б – график энергии сигнала ЭМГ; в – график огибающей энергии ЭМГ (интерполяция по 80 точкам); г – построение временных интервалов сосредоточения энергии ЭМГ (граница значимости 20 %); д – построение окон стимуляции

5. Расчет амплитуды стимулирующего сигнала для каждого окна стимуляции. Амплитуда стимулирующего сигнала определяется пропорционально энергии ЭМГ, сосредоточенной в окне стимуляции:

$$A^k = \frac{E_{стим}^k \cdot A_{max}}{E_{стим}^{max}} \quad (B), \quad (5)$$

где  $A^k$  – амплитуда стимулирующего сигнала для  $k$ -го окна стимуляции;  $E_{стим}^k$  – значение энергии ЭМГ, сосредоточенной в  $k$ -м окне стимуляции;  $A_{max}$  – максимальная амплитуда стимуляции (В), значение которой задается интерактивно;  $E_{стим}^{max}$  – наибольшее значение энергии ЭМГ в окне стимуляции среди всех рассматриваемых каналов.

На данном этапе возможно сохранение программы многоканальной электростимуляции как эталонной.

6. *Корректировка окон стимуляции.* С целью формирования нового двигательного навыка или коррекции уже сформированного двигательного стереотипа производится корректировка окон стимуляции на основе эталонных данных (эталонная программа стимуляции) или в соответствии с целевой функцией. При этом фиксируется выбранное окно стимуляции нужного канала, а остальные окна сдвигаются в соответствии с требуемой структурой движения.

Таким образом, в результате построения индивидуальной программы многоканальной электростимуляции на основе ЭМГ портрета движения человека для каждой мышцы определяется время начала и окончания стимулирующего воздействия, а также амплитуда сигнала электростимуляции.

На рисунке 3 представлен пример разработки индивидуальной программы многоканальной электростимуляции на основе ЭМГ портрета спортивного движения «прыжок вверх с места». Параметры разработки программы электростимуляции: ширина окна интерполяции сигнала энергии ЭМГ – 80 точек; граница значимости временных интервалов сосредоточения энергии ЭМГ – 30 %; ширина окна стимуляции – 90 %; корректировка окон стимуляции – на основе эталонной программы стимуляции.

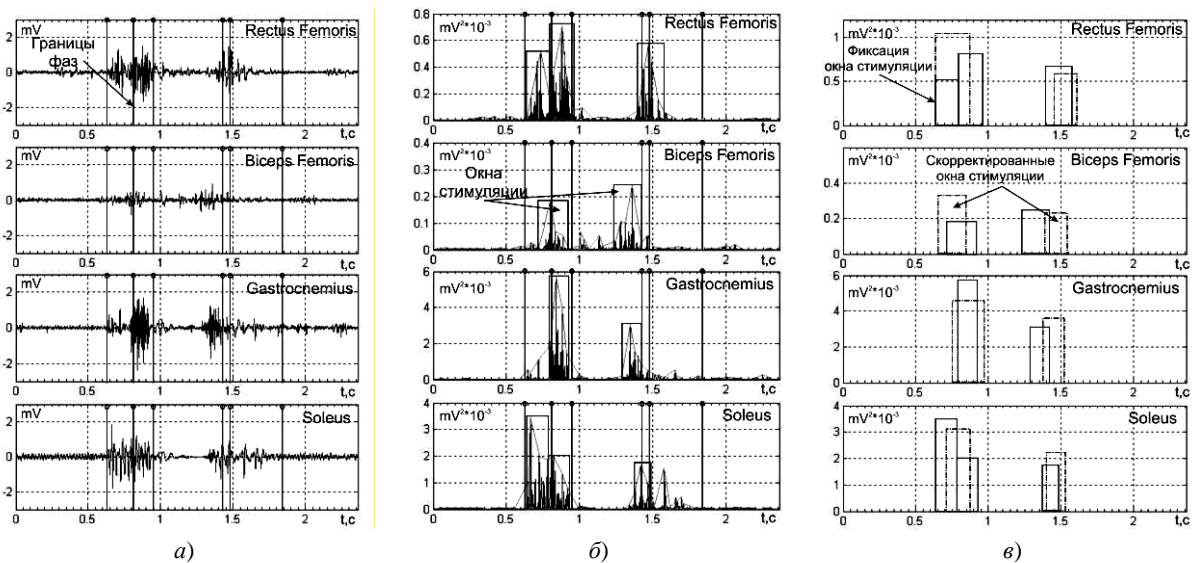


Рис. 3. ЭМГ образ движения «прыжок вверх с места» (а); индивидуальная программа многоканальной электростимуляции (б); корректировка окон стимуляции (в)

Исходя из разработанного алгоритма построения индивидуальной программы многоканальной электростимуляции на основе ЭМГ портрета движения человека предложена структурная схема технической системы многоканальной электростимуляции с программным управлением параметрами стимулирующих сигналов и временной последовательностью их следования в соответствии с необходимой структурой формируемого или корректируемого двигательного навыка (рис. 4).

Предложенная техническая система электростимуляции на начальном этапе проводит диагностику корректируемого двигательного навыка человека посредством многоканальной электромиографии (блок диагностики). Далее в блоке выделения окон стимуляции осуществляется построение индивидуальной программы многоканальной электростимуляции, при этом предусмотрена возможность задания пользователем критериев выделения окон стимуляции (ширина окна интерполяции сигнала энергии ЭМГ исследуемых мышц, граница значимости временных интервалов сосредоточения энергии ЭМГ исследуемых мышц, ширина окна стимуляции). В блоке корректировки окон стимуляции производится корректи-

ровка выделенных окон стимуляции на основе эталонных данных (блок эталонных программ стимуляции) или в соответствии с целевой функцией посредством пользовательского интерфейса. Кроме того, пользователь задает параметры стимулирующего сигнала: вид сигнала, частоту сигнала, максимальную амплитуду сигнала. С целью организации диалогового интерфейса с пользователем в течение всего времени разработки индивидуальной программы многоканальной электростимуляции осуществляется отображение текущей информации (устройство отображения информации). В свою очередь устройство управления служит для организации работы устройства в целом.

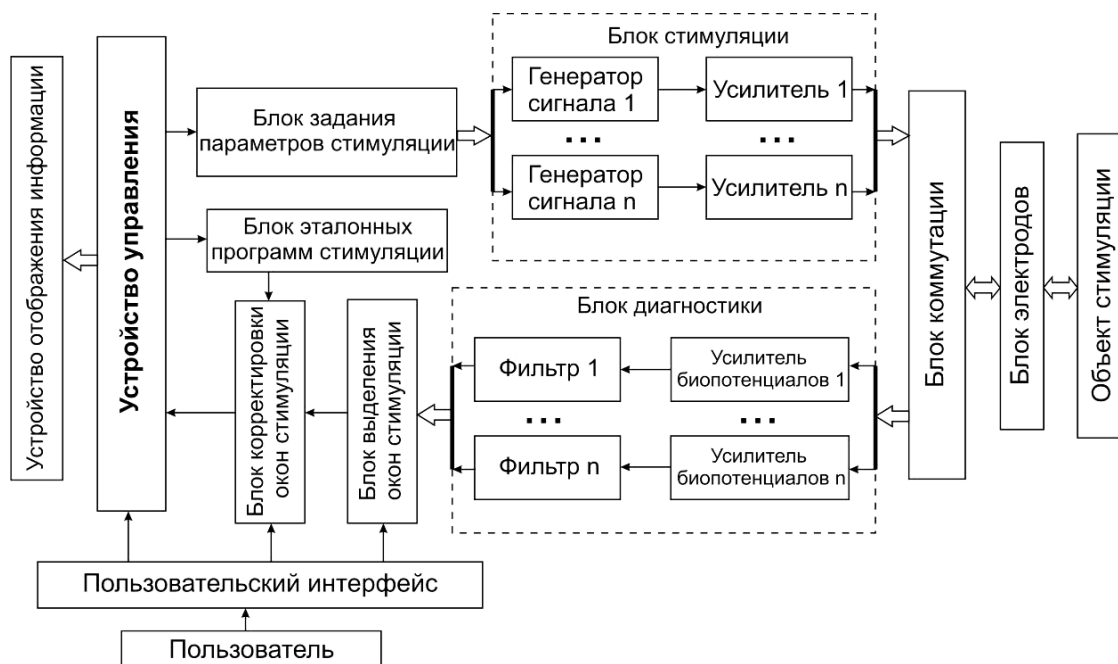


Рис. 4. Структурная схема технической системы многоканальной электростимуляции для управляемого изменения двигательного навыка человека

В соответствии с разработанной программой многоканальной электростимуляции и заданными параметрами стимулирующего сигнала (блок задания параметров стимуляции) блок стимуляции формирует стимулирующий сигнал для каждого канала с учетом временной структуры следования окон стимуляции и амплитуды стимулирующего сигнала в каждом окне стимуляции.

Для стимуляции и съема биоэлектрической активности мышц используются одни и те же пары электродов (блок электродов), подключаемые с помощью блока коммутации к блоку диагностики в режиме съема многоканальных электромиограмм и к блоку стимуляции – в режиме многоканальной электростимуляции.

**Закключение.** В результате проведенного исследования предложен метод управляемого изменения двигательного навыка человека на основе многоканальной электростимуляции, программа которой разрабатывается индивидуально и соответствует особенностям функциональной структуры движения человека и его двигательным способностям. Для функциональной диагностики двигательных способностей человека и оценки уже сформированного двигательного стереотипа предлагается комплексный анализ пространственно-временной и иннервационной структуры движения путем построения и анализа электромиографического портрета движения. Электромиографический портрет движения позволяет оценить функциональное состояние нервно-мышечного аппарата человека и межмышечную координацию, определить последовательность включения мышц в процессе выполнения движения и исследовать распределение усилий работающих мышц по фазам движения. Программа многоканальной электростимуляции разрабатывается индивидуально на базе построенного электромиографического портрета исследуемого движения с последующей корректировкой окон стимуляции в зависимости от целевой функции.

Рассмотрена техническая система многоканальной электростимуляции с программным управлением параметрами стимулирующих сигналов и временной последовательностью их следования в соответствии с необходимой структурой формируемого или корректируемого двигательного навыка. Техническая система реализует предложенный метод управляемого изменения двигательного навыка человека на основе многоканальной электростимуляции, программа которой разрабатывается индивидуально на базе электромиографического портрета исследуемого движения. Предложенная техническая система позволяет

проводить функциональную диагностику корректируемого двигательного навыка человека посредством многоканальной электромиографии, строить индивидуальную программу многоканальной электростимуляции в соответствии с двигательными особенностями человека и необходимой структурой корректируемого двигательного навыка и непосредственно проводить процедуру многоканальной электростимуляции.

Таким образом, предложенный метод и технические средства управляемого изменения двигательного навыка человека на основе многоканальной электростимуляции позволят искусственно смоделировать работу мышечных групп в соответствии с эталонным образом движения и целевой функцией с учетом особенностей функциональной структуры двигательного навыка человека и его двигательных способностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Покровский, В.М. Физиология человека / В.М. Покровский; под ред. В.М. Покровского, Г.Ф. Коротко. – М.: Медицина, 1997. – 448 с.
2. Анохин, П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем / П.К. Анохин // Принципы системной организации функций. – М.: Наука, 1973. – С. 5 – 61.
3. Бернштейн, Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности / Н.А. Бернштейн; под общ. ред. О.Г. Газенко. – М.: Наука, 1990. – 492 с.
4. Коц, Я.М. Физиология мышечной деятельности: учебник для ин-тов физ. культуры / Я.М. Коц; под ред. Я.М. Коца. – М.: Физкультура и спорт, 1982. – 347 с.
5. Шамонина, О.Н. Совершенствование двигательной деятельности человека на основе совместного использования естественной и искусственной активизации мышц: автореф. дис. ... канд. пед. наук: 13.00.04 / О.Н. Шамонина. – Хабаровск, 2005. – 24 с.
6. «Миотон» в управлении движениями / Л.С. Алев. – Киев: Наук. думка, 1980. – 143 с.
7. Витензон, А.С. Разработка метода и средств искусственной коррекции движений посредством электрической стимуляции мышц при патологической ходьбе / А.С. Витензон. – М.: ФЦЭРИ, 2002. – 241 с.
8. Персон, Р.С. Электромиография в исследованиях человека / Р.С. Персон. – М.: Медицина, 1969. – 125 с.
9. Гехт, Б.М. Теоретическая и клиническая электромиография / Б.М. Гехт. – Л.: Наука, 1990. – 229 с.
10. Биомеханическое и электромиографическое исследование ходьбы больных с последствиями позвоночно-спинальной травмы шейного отдела / Е.М. Миронов [и др.] // Вестн. травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. – 2005. – № 1. – С. 55 – 61.
11. Экспресс-диагностика функционального состояния нервно-мышечного аппарата спортсмена на основе построения и анализа электромиографического портрета прыжка / Н.С. Давыдова [и др.] // Инженерный вестник. – 2010. – № 2(30). – С. 86 – 91.
12. Методика оценки восстановления функционального состояния опорно-двигательного аппарата спортсмена в посттравматический период / Н.С. Давыдова [и др.] // Современные проблемы курортной терапии: материалы респ. науч.-практ. конф. – Гродно: ГрГМУ, 2010. – С. 170 – 174.

Поступила 23.01.2012

#### THE METHOD AND TECHNIQUE OF CONTROLLED MODIFICATION OF THE PERSON MOTION PATTERN ON THE BASIS OF MULTICHANNEL ELECTROSTIMULATION

N. DAVYDOVA, A. OSIPOV, M. DAVYDOV, M. MEZHENNAYA

*The article is devoted a problem of forming and correction of the person motion pattern with the defined parameters. Physiological mechanisms of the human movement organization have been analyzed. The method of controlled modification of the person motion pattern has been offered. The method is based on the multichannel electrostimulation which program is developed individually. The program corresponds to features of functional structure of movement of the person and its motion abilities. The technical system of multichannel electrostimulation with program control of the parameters of stimulating has been considered.*