

УДК 51-76; 612.741.1; 612.76

ОЦЕНКА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ДВИГАТЕЛЬНОГО НАВЫКА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Н.С. ДАВЫДОВА, А.Н. ОСИПОВ, В.А. КУЛЬЧИЦКИЙ*,
М.В. ДАВЫДОВ, М.М. МЕЖЕННАЯ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

**Институт физиологии НАН Беларуси
Академическая, 28, Минск, 220072, Беларусь*

Поступила в редакцию 16 января 2012

Работа посвящена проблеме анализа стабильности выполнения человеком заданного двигательного действия. Предложена оценка вариабельности двигательного навыка человека на основе электрофизиологических и биомеханических параметров движения вне зависимости от силы выполнения движения с учетом степени участия исследуемых мышц и степени значимости каждой фазы движения. Проведены исследования вариабельности двигательного навыка человека при выполнении тестового движения «прыжок вверх с места».

Ключевые слова: двигательный навык, многоканальная электромиография, подография, электромиографический портрет движения, цифровая обработка сигнала, статистический анализ.

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 [1].

Задача оценки стабильности выполнения человеком заданного двигательного действия является актуальной для спорта (контроль процесса обучения спортивным движениям, прогнозирование двигательной одаренности у детей), медицины (оценка степени восстановления/формирования двигательных навыков после травм опорно-двигательного аппарата), профессионально-трудовой деятельности (контроль обучения специализированным действиям, профессиональный отбор) и требует создания специализированных технических и программных средств для точной и быстрой диагностики двигательных способностей человека.

Прочно сформированные двигательные навыки характеризуются стабильностью временных, пространственных и силовых параметров [2, 3]. Вариабельность биомеханических и электрофизиологических параметров двигательного навыка является показателем несовершенства двигательного акта, поскольку это свидетельствует о повышении затрат мышечной энергии на коррекцию и поддержание двигательного стереотипа [4].

Предлагается оценка вариабельности двигательного навыка человека, основанная на анализе значимых электрофизиологических и биомеханических параметров неоднократно повторяемого движения.

Методы комплексного исследования двигательных навыков человека

Любой двигательный навык может быть рассмотрен как иерархическая функциональная система, включающая несколько уровней управления движением [5–7]. Управление движениями в организме 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. Для изучения такой функциональной системы необходимы методы, которые связаны с непосредственной регистрацией управляющих сигналов, поступающих к мышцам в процессе двигательной активности. Наиболее удобным, простым и безболезненным из таких методов является многоканальная интерференционная электромиография (ЭМГ), которая позволяет исследовать биоэлектрическую активность заданного количества мышц одновременно [8]. Так как любой двигательный навык имеет постоянный рисунок возбуждения мышц [1, 9], то возможно построение иннервационной структуры движения, которая представляет собой устойчивые сочетания активности мышц, используемые в конкретном движении.

Между тем, для комплексного анализа двигательного навыка необходимо сопоставление иннервационной структуры движения с пространственно-временными характеристиками выполняемых действий. 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, позволяет представить информацию в наглядной форме.

Такая совокупность временных, пространственных и амплитудных электромиографических характеристик получила название электромиографического (ЭМГ) портрета движения [10, 11].

Оценка вариабельности двигательного навыка человека

Предложена оценка вариабельности двигательного навыка человека на основе анализа параметров электромиографических портретов исследуемого движения, повторяемого в течение заданного количества раз.

Разработана методика и программно-технические средства для исследования иннервационной и пространственно-временной структуры движения на основе многоканальной электромиографии и подографии [12]. Методика включает: 1) синхронную регистрацию заданного количества каналов электромиограммы и четырех каналов подограммы (регистрируются моменты отрыва и касания отдельно пятки и носка каждой ноги); 2) цифровую обработку полученных сигналов ЭМГ и ПДГ и построение электромиографического портрета движения; 3) анализ электромиографического портрета движения, который сводится к рассмотрению энергетического вклада каждой мышцы в формирование движения, оценке характера распределения усилий работающих мышц по фазам движения, а также вычислении общих динамических характеристик движения [13].

На рис. 1,а показан пример ЭМГ портрета движения «прыжок вверх с места». На рисунке представлены нормированные электромиограммы мышц Rectus Femoris, Viceps 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 рис. 1,б представлены кадры синхронной видеосъемки, соответствующие выделенным фазам движения.

Исходными данными для оценки вариабельности двигательного навыка человека являются суммарная энергия ЭМГ исследуемых мышц (рис 2,а) и распределение энергии ЭМГ ка-

ждой мышцы по фазам движения в процентах от суммарной энергии и в абсолютных единицах (рис. 2,б).

Суммарная энергия сигнала ЭМГ каждой мышцы m :

$$E_m = \sum_{i=1}^n (x_{m,i})^2 / n \text{ (мВ}^2\text{)}, \quad (1)$$

где $x_{m,i}$ – амплитуда i -го дискретного отсчета сигнала ЭМГ m -й мышцы; n -число дискретных отсчетов сигнала ЭМГ.

Аналогично для каждой мышцы (m) рассчитывается энергия сигнала ЭМГ в пределах каждой фазы (f) исследуемого движения $E_{m,f}$.

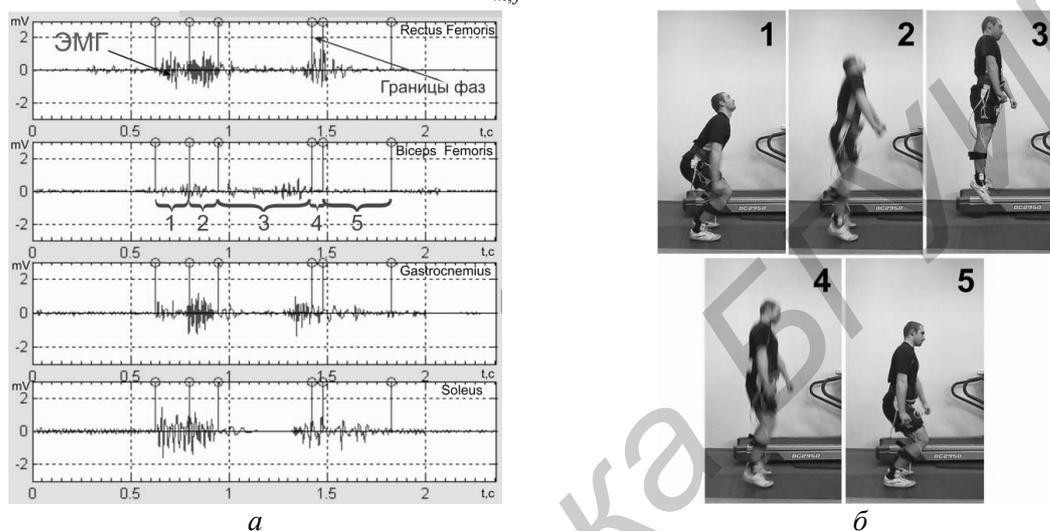


Рис. 1. Пример ЭМГ портрета движения «прыжок вверх с места» (а); кадры синхронной видеосъемки, соответствующие выделенным фазам движения (б): 1 – фаза подседа, 2 – фаза толчка, 3 – фаза полета, 4 – фаза приземления, 5 – фаза подъема

В каждой фазе движения (f) для всех мышц (m) рассчитывается доля энергии сигнала ЭМГ, сосредоточенная в рассматриваемой фазе, в процентах от суммарной энергии:

$$E_{m,f}^{\%} = (E_{m,f} / E_m) \cdot 100\% \text{ (}\% \text{)}, \quad (2)$$

где $E_{m,f}$ – энергия сигнала ЭМГ мышцы m в f -ой фазе рассматриваемого движения в абсолютных единицах; E_m – суммарная энергия сигнала ЭМГ мышцы m .

Оценка вариабельности двигательного навыка человека основывается на анализе характера распределения энергии ЭМГ исследуемых мышц по фазам неоднократно повторяемого движения. Такой подход позволяет оценить вариабельность двигательного навыка человека вне зависимости от силы выполнения тестового движения.

Этапы оценки вариабельности двигательного навыка человека.

1. Анализ вариабельности характера распределения энергии ЭМГ исследуемых мышц по фазам движения.

Для каждой мышцы (m) во всех фазах (f) движения находится среднее значение и среднеквадратичное отклонение доли энергии ЭМГ, сосредоточенной в рассматриваемой фазе, в процентах от суммарной энергии:

$$E_{m,f}^{\text{ср}\%} = \sum_{i=1}^N E_{m,f}^{i\%} / N, \text{ (}\% \text{)}. \quad (3)$$

$$\Delta x_{m,f}^{\text{ср}\%} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (E_{m,f}^{i\%} - E_{m,f}^{\text{ср}\%})^2 / N}, \text{ (}\% \text{)} \quad (4)$$

где N – количество попыток исследуемого движения, i – номер попытки, m – номер мышцы, f – номер фазы движения, $E_{m,f}^{i\%}$ – доля энергии сигнала ЭМГ m -й мышцы в f -ой фазе рассматриваемого движения в процентах от суммарной энергии мышцы для i -й попытки.

Среднеквадратичное отклонение доли энергии ЭМГ ($\Delta x_{m,f}^{cp\%}$) исследуемых мышц во всех фазах движения представляет собой процентное отклонение суммарной энергии ЭМГ мышц по фазам движения и характеризует степень варибельности характера распределения энергии ЭМГ каждой мышцы по фазам движения.

2. Определение коэффициентов значимости для исследуемых мышц.

Для каждой мышцы определяется коэффициент значимости, как доля средней суммарной энергии ЭМГ каждой мышцы от суммарной энергии ЭМГ портрета движения.

Для каждой мышцы находится среднее значение суммарной энергии ЭМГ:

$$E_m^{cp} = \sum_{i=1}^N E_m^i / N, \text{ (мВ}^2\text{)} \quad (5)$$

где N – количество попыток исследуемого движения, i – номер попытки, m – номер мышцы, E_m^i – суммарная энергия ЭМГ m -й мышцы для i -й попытки.

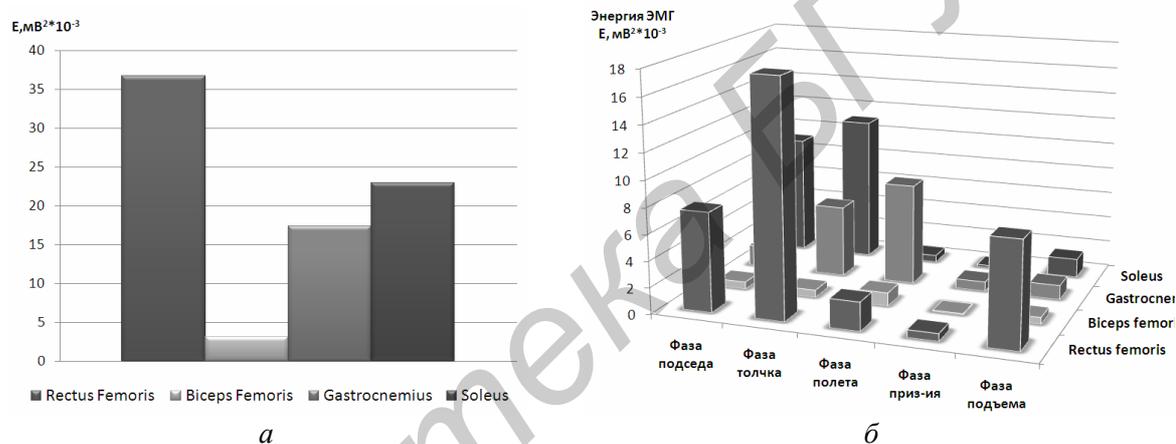


Рис. 2. Пример анализа ЭМГ портрета движения «прыжок вверх с места»: суммарная энергия ЭМГ исследуемых мышц (а); абсолютное распределение энергии ЭМГ исследуемых мышц по фазам движения (б)

Для исследуемого двигательного навыка рассчитывается средняя суммарная энергия ЭМГ портрета движения:

$$E_{\Sigma}^{cp} = \sum_{m=1}^M E_m^{cp}, \text{ (мВ}^2\text{)} \quad (6)$$

где M – количество исследуемых мышц, m – номер мышцы, E_m^{cp} – средняя суммарная энергия ЭМГ m -й мышцы.

Для каждой исследуемой мышцы (m) рассчитывается коэффициент значимости:

$$k_m = E_m^{cp} / E_{\Sigma}^{cp}, \quad (7)$$

где m – номер мышцы, E_m^{cp} – средняя суммарная энергия ЭМГ m -й мышцы, E_{Σ}^{cp} – суммарная энергия ЭМГ портрета движения.

Коэффициент значимости мышцы k_m имеет значение в диапазоне [0 1].

3. Определение коэффициентов значимости фаз исследуемого движения.

Для каждой фазы определяется коэффициент значимости, как доля средней суммарной энергии ЭМГ фазы движения от суммарной энергии ЭМГ портрета движения.

Для каждой мышцы во всех фазах движения находится среднее значение энергии ЭМГ, сосредоточенной в рассматриваемой фазе, в абсолютных единицах:

$$E_{m,f}^{cp} = \sum_{i=1}^N E_{m,f}^i / N, \text{ (мВ}^2\text{)} \quad (8)$$

где N – количество попыток исследуемого движения, i – номер попытки, m – номер мышцы, f – номер фазы движения, $E_{m,f}^i$ – энергия сигнала ЭМГ мышцы m в f -ой фазе рассматриваемого движения в абсолютных единицах для i -й попытки.

Для каждой фазы (f) движения рассчитывается средняя суммарная энергия ЭМГ фазы:

$$E_f^{cp} = \sum_{m=1}^M E_{m,f}^{cp}, \text{ (мВ}^2\text{)} \quad (9)$$

где M – количество исследуемых мышц, m – номер мышцы, f – номер фазы движения, $E_{m,f}^{cp}$ – средняя энергия ЭМГ m -й мышцы, сосредоточенная в f -ой фазе исследуемого движения, в абсолютных единицах.

Для каждой фазы (f) рассчитывается коэффициент значимости

$$k_f = E_f^{cp} / E_{\Sigma}^{cp}, \quad (10)$$

где f – номер фазы, E_f^{cp} – средняя суммарная энергия ЭМГ f -ой фазы, E_{Σ}^{cp} – суммарная энергия ЭМГ портрета движения.

Коэффициенты значимости фаз движения k_f имеют значение в диапазоне [0 1].

4. Расчет коэффициента варибельности двигательного навыка.

Коэффициент варибельности двигательного навыка рассчитывается как сумма взвешенных средних отклонений доли энергии ЭМГ мышц во всех фазах движения:

$$K = \sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F k_f \cdot k_m \cdot \Delta x_{m,f}^{cp\%}, \quad (11)$$

где f – номер фазы, F – количество фаз движения, m – номер мышцы, M – количество исследуемых мышц, k_f – коэффициент значимости f -ой фазы движения, k_m – коэффициент значимости m -й мышцы, $\Delta x_{m,f}^{cp\%}$ – среднее отклонение доли энергии ЭМГ m -й мышцы в f -ой фазе движения.

Экспериментальные исследования тестового движения и обсуждение результатов

На базе спортивного комплекса Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники были проведены исследования двигательного навыка человека при выполнении тестового движения «прыжок вверх с места». Прыжок вверх с места является скоростно-силовым упражнением и используется как тестовое движение для оценки двигательных способностей при отборе спортсменов в скоростно-силовых видах спорта [14,15].

В исследованиях принимали участие 30 человек (7 женщин, 23 мужчины) в возрасте 17 – 25 лет с различной физической подготовкой. Из них были сформированы следующие группы: 1) группа общей физической подготовки (отсутствие регулярного занятия спортом) – 14 человек; 2) группа хорошей физической подготовки (систематическое занятие спортом) – 10 человек; 3) спортсмены (посещение специализированных секций) – 6 человек. Исследовались мышцы Rectus Femoris, Viceps Femoris, Gastrocnemius и Soleus правой ноги.

Проведен анализ варибельности двигательного навыка при выполнении тестового движения по следующему алгоритму:

1) для каждого испытуемого строился ЭМГ портрет тестового движения для трех попыток выполнения последнего;

2) рассчитывался коэффициент варибельности двигательного навыка в соответствии с описанной выше методикой;

3) для выделенных (по уровню физической подготовленности) групп испытуемых рассчитывались среднее значение и среднее квадратичное отклонение коэффициента варибельности двигательного навыка K . Полученные данные представлены в таблице.

Установлено, что наибольшая варибельность двигательного навыка характерна для группы испытуемых с общей физической подготовкой ($K = 7,66 \pm 1,74$). Для групп хорошей физической подготовки и спортсменов значение коэффициента варибельности значительно ниже ($K = 4,69 \pm 0,97$ и $K = 3,98 \pm 0,62$ соответственно). Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что систематическое занятие спортом приводит к автоматизации двигательного навыка и, как следствие, к уменьшению варибельности биомеханических и электрофизиологических параметров последнего.

Данные исследования варибельности двигательного навыка человека

Исследуемый параметр	Группа общей физической подготовки	Группа хорошей физической подготовки	Спортсмены
Среднее значение K	7,66	4,69	3,98
Среднеквадратичное отклонение K	1,74	0,97	0,62

Кроме того, проведен анализ зависимости коэффициента варибельности и эффективности выполнения тестового движения. В качестве параметра, отражающего эффективность выполнения тестового движения, выбрана общая работа прыжка.

Общая работа тестового движения «прыжок вверх с места»:

$$A_{\text{прыжка}} = m \cdot g \cdot h, \text{ (Дж)} \quad (12)$$

где m – масса тела исследуемого, h – высота прыжка, g – ускорение свободного падения.

На рис. 3 представлена точечная диаграмма, демонстрирующая связь коэффициента варибельности и работы тестового движения.

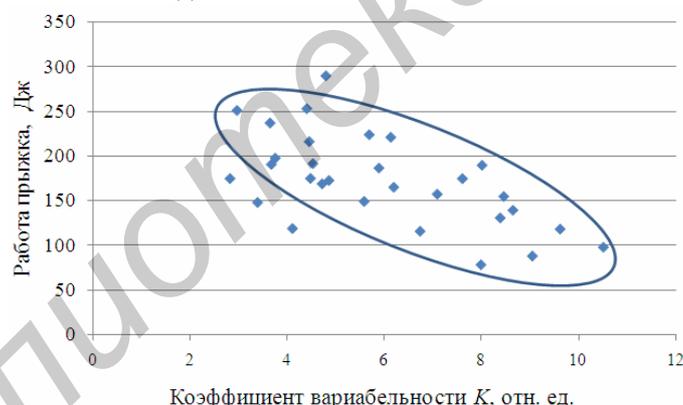


Рис. 3. Взаимозависимость коэффициента варибельности и работы тестового движения

Степень корреляции значений коэффициента варибельности и общей работы прыжка оценивалась в соответствии со значением коэффициента линейной корреляции Пирсона. Для представленных исследований коэффициент линейной корреляции Пирсона $r = -0,611$. Полученный коэффициент корреляции проверялся на значимость с помощью таблицы критических значений. Для уровня значимости $p \leq 0,005$ критический коэффициент значимости $r = 0,463$, что позволяет сделать вывод о значимой корреляции между коэффициентом варибельности и общей работой прыжка ($r = -0,611$; $p \leq 0,005$).

Заключение

Предложена оценка варибельности двигательного навыка человека на основе анализа параметров электромиографических портретов исследуемого движения. Такой подход позволяет определить стабильность результата двигательного действия вне зависимости от силы выполнения движения с учетом степени участия исследуемых мышц и степени значимости каждой фазы движения.

Проведены исследования variability двигательного навыка человека при выполнении тестового движения «прыжок вверх с места». На основе экспериментальных данных показано, что коэффициент variability двигательного навыка связан с тренированностью испытуемого. Для группы общей физической подготовки значение коэффициента variability равно $7,66 \pm 1,74$; для групп хорошей физической подготовки и спортсменов значение коэффициента равно $4,69 \pm 0,97$ и $3,98 \pm 0,62$ соответственно. Установлено, что значение коэффициента variability двигательного навыка имеет значимую корреляцию с общей работой тестового движения (коэффициент линейной корреляции Пирсона $r = -0,611$, уровень значимости $p \leq 0,005$).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что снижение значений коэффициента variability свидетельствует о стабильности результата действия и, соответственно, о закреплении двигательного навыка человека. Полученные результаты могут быть использованы при создании специализированных технических и программных средств для прецизионной и оперативной диагностики двигательных способностей человека в спорте и медицине.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования РБ на 2011 год «Метод и технические средства дистанционной функциональной диагностики двигательных навыков спортсменов на основе многоканальной электромиографии».

THE ESTIMATION OF THE PERSON MOTION PATTERN VARIABILITY ON THE BASIS OF ELECTROPHYSIOLOGICAL AND BIOMECHANICAL PARAMETERS OF THE MOVEMENT

N.S. DAVYDOVA, A.N. OSIPOV, V.A. KULCHITSKY,
M.V. DAVYDOV, M.M. MEZHENNAYA

Abstract

The article is devoted to the problem of the analysis of person motion pattern stability. The estimation of person motion pattern variability on the basis of electrophysiological and biomechanical parameters of movement has been offered. Such approach allows defining stability of the motion action result without dependence from the movement force, but in consideration of level of the muscles participation and level of the movement phases importance. Investigation of the person motion pattern variability for the test movement has been executed.

Список литературы

1. Покровский В.М. Физиология человека. М., 1997.
2. Лукьяненко В.П. Физическая культура. М., 2003.
3. Менхин Ю.В. // Теория и практика физической культуры. 2007. №2. С. 12–17.
4. Жилев А.А. // Теория и практика физической культуры. 2001. №10. С. 41–43.
5. Анохин П.К. // Принципы системной организации функций. М., 1973.
6. Бернштейн Н.А. О построении движений. М., 1947.
7. Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М., 1966.
8. Гехт Б.М. Теоретическая и клиническая электромиография. Л., 1990.
9. Персон Р.С. Электромиография в исследованиях человека. М., 1969.
10. Алев Л.С. «Миотон» в управлении движениями. Киев, 1980.
11. Миронов Е.М., Витензон А.С. // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2005. №1. С. 55–61.
12. Давыдова Н.С. // Научно-технический журнал «Инженерный вестник». 2010. №2(30). С.86–91.
13. Давыдова Н.С. // Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы курортной терапии». Гродно: ГрГМУ, 2010. С.170–174.
14. Бондаревский Е.Я. // Теория и практика физической культуры. 1983. №1. С.23–25.
15. Селуянов В.Н. Подготовка бегуна на средние дистанции. М., 2007.