

УДК 616-7

СТАБИЛОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ С НАРУШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЗЫ

В.А. ДУБОВСКИЙ

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Академическая, 12, Минск, 220072, Беларусь*

Поступила в редакцию 18 мая 2016

С единых методологических позиций обобщены результаты разработки и исследования методов реабилитации пациентов с нарушенной устойчивостью вертикальной позы, основанных на использовании стабилومترической платформы балансировочного типа с биологической обратной связью по отклонению опорной поверхности платформы от горизонтального положения. Совокупность разработанных методов создает основу для развития методологии создания биотехнических систем реабилитации пациентов с заболеваниями центральной нервной системы, основанных на использовании стабилومترических платформ с неустойчивой опорной поверхностью и биологической обратной связи по ее положению, а также расширения функциональных возможностей и областей применения.

Ключевые слова: стабилметрия, реабилитация, устойчивость вертикальной позы, биологическая обратная связь.

Введение

Тенденция к росту в мире числа заболеваний центральной нервной системы (ЦНС), сопровождающихся двигательными нарушениями (прежде всего нарушениями устойчивости вертикальной позы), которые трудно восстанавливаются и часто ведут к инвалидности пациентов, обуславливает целесообразность создания новых более эффективных реабилитационных технологий. Это свидетельствует об актуальности задачи восстановления функции движения у пациентов с заболеваниями ЦНС [1, 2].

Одним из направлений решения указанной задачи является создание стабилومترических систем для обучения пациентов произвольному управлению позой тела без потери равновесия в ходе выполнения специальных двигательных задач с использованием биологической обратной связи (БОС) по стабิโลграмме [3, 4]. При этом традиционно используются статические стабилومترические платформы со зрительной и/или акустической БОС по опорной реакции [5]. Повысить эффективность такого рода реабилитационных технологий можно путем введения дополнительного контура тактильной БОС и усиления потока нервных импульсов, поступающих в ЦНС от проприоцепторов опорно-двигательного аппарата, для чего целесообразно использовать платформу балансировочного типа с БОС по отклонению опорной поверхности от горизонтального положения [6]. Кроме того, повышение эффективности восстановительного лечения может быть достигнуто на основе комплексной тренировки двигательных и когнитивных функций, связанных с обеспечением устойчивости вертикального положения тела [7].

Предлагаемые в статье методы функционального биоуправления предполагают использование стабилومترических платформ балансировочного типа с БОС по отклонению опорной поверхности от горизонтального положения. Разработанные методы направлены на восстановление функции движения пациентов путем тренировки их способности управлять центром тяжести (ЦТ) своего тела в ходе выполнения специальных двигательных задач и позволяют оценивать и тренировать двигательные и когнитивные функции, связанные с обеспечением устойчивости вертикального положения тела.

Описание методов

Для выработки у пациентов специализированных двигательных навыков, связанных с обеспечением устойчивости вертикального положения тела, разработаны методы оценки и тренинга навыков удержания равновесия [8], своевременного реагирования на внешние стимулы [9], воспроизведения движениями ЦТ тела заданной траектории [10] и синхронизации движений ЦТ тела с заданным ритмом [11]. В предложенных методах задают область допустимых отклонений опорной поверхности платформы от горизонтального положения, например, в виде круга C с центром в точке O , соответствующей ее горизонтальному положению (рис. 1) и разделяют ее на ряд секторов, в каждом из которых при предельном отклонении она оказывается в заданном устойчивом положении (на рисунке 1 область C разделена на 8 секторов).

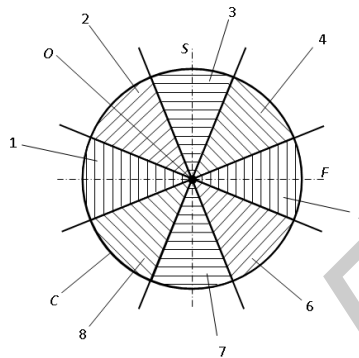


Рис. 1. Условное изображение области C допустимых отклонений опорной поверхности от горизонтального положения: 1,...,8 – секторы; O – центральная точка области C ; S – сагиттальная плоскость; F – фронтальная плоскость

Первый из них позволяет тестировать и тренировать у человека навык удержания равновесия своего тела в условиях неустойчивой опоры и получить многокомпонентную характеристику функции равновесия, содержащую численные значения ее показателей в различных направлениях относительно центральной гравитационной оси тела. В соответствии с данным методом испытуемого устанавливают на платформу так, чтобы центральная гравитационная ось его тела совпадала с вертикальной осью платформы. С использованием БОС ему предъявляют информацию о положении опорной поверхности платформы в виде сигналов, отражающих ее выход из области допустимых отклонений в каждом из секторов, и дают задание удерживать платформу в заданной области. В ходе тестирования измеряют суммарное время t_i нахождения опорной поверхности вне заданной области для каждого i -го сектора. По истечении времени T тестирования определяют показатели функции равновесия для каждого i -го сектора по формуле: $E_i = 1 - \frac{t_i}{T}$.

Совокупность полученных показателей E_i дает многокомпонентную характеристику функции равновесия человека, что повышает информативность результатов тестирования и тренинга. Кроме того, переходы из неустойчивого положения опорной поверхности в устойчивые служат для пациента дополнительным контуром тактильной обратной связи, что повышает эффективность двигательного обучения.

Второй метод позволяет тестировать и тренировать у человека навык своевременного реагирования на внешние стимулы перемещением ЦТ своего тела из заданных устойчивых положений платформы в направлении его центральной гравитационной оси и получить при этом численные значения времени двигательных реакций. В соответствии с данным методом испытуемого устанавливают на платформу так, чтобы центральная гравитационная ось его тела совпадала с вертикальной осью платформы. Посредством БОС ему предъявляют информацию о текущем положении опорной поверхности. Задают ряд устойчивых положений платформы и предлагают испытуемому, последовательно находясь в каждом из них, как можно быстрее реагировать на предъявляемые стимулы перемещением ЦТ своего тела в направлении его центральной гравитационной оси. При этом в каждом случае измеряют время реакции. По

полученным значениям времени реакции можно судить о способности испытуемого оперативно восстанавливать равновесие из различных положений тела в ответ на изменение внешних стимулов. Полученные показатели могут быть представлены в виде диаграммы, пример которой приведен на рис. 2. На диаграмме время реагирования человека вперед, назад, влево и вправо обозначено $t_{\text{вперед}}$, $t_{\text{назад}}$, $t_{\text{влево}}$, $t_{\text{вправо}}$ соответственно. В приведенном примере $t_{\text{вперед}} = 0,65$ с, $t_{\text{назад}} = 0,47$ с, $t_{\text{влево}} = 0,56$ с и $t_{\text{вправо}} = 0,41$ с, а в качестве максимально допустимого принято значение времени реакции, равное 0,7 с, полученное в результате экспериментальных исследований. Среднее значение указанных показателей дает обобщенную характеристику способности человека реагировать на внешние стимулы перемещением тела.

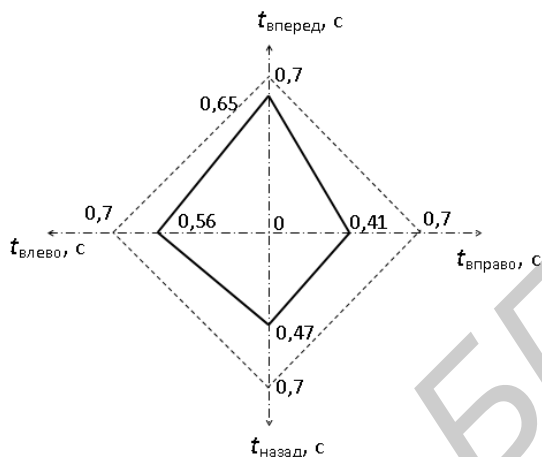


Рис. 2. Диаграмма показателей способности человека своевременно реагировать изменением позы в заданных направлениях: $t_{\text{вперед}}$, $t_{\text{назад}}$, $t_{\text{влево}}$, $t_{\text{вправо}}$, – время реакции человека вперед, назад, влево и вправо соответственно

Для выработки навыков выполнения сложнокоординированных движений без потери равновесия предложены методы тестирования и тренинга устойчивости вертикального положения тела (методы оценки и тренинга способности человека воспроизводить заданную траекторию движения ЦТ тела [12] и синхронизировать движения ЦТ тела с заданным ритмом [13]), основанные на выработке навыка у человека перемещать ЦТ своего тела по заданной пространственно-временной траектории. Отличительной особенностью предложенных методов является то, что область отклонений опорной поверхности платформы от горизонтального положения также разделяют на ряд секторов, симметричных относительно вертикальной оси платформы, в каждом из которых при предельном отклонении она оказывается в устойчивом положении, и соотносят заданную траекторию с определенной последовательностью устойчивых положений платформы. Данные методы также характеризуются наличием дополнительного контура тактильной обратной связи, что повышает эффективность двигательного обучения.

Первый из них позволяет тестировать и тренировать у человека способность воспроизведения заданной траектории движения ЦТ тела. В соответствии с данным методом перед тестированием задают траекторию движения ЦТ тела, которой ставят в соответствие определенную последовательность устойчивых положений опорной поверхности платформы, и предъявляют ее испытуемому. При тестировании испытуемый, стоя на платформе в вертикальной позе, должен как можно более точно воспроизвести заданную траекторию, изменяя положение ЦТ своего тела и посредством БОС, получая в реальном масштабе времени информацию о текущем положении опорной поверхности. В процессе тестирования регистрируют полученную испытуемым траекторию движения опорной поверхности, а по окончании тестирования сравнивают ее с заданной последовательностью ее устойчивых положений и на основании их рассогласования делают вывод о способности человека воспроизводить заданную траекторию движения ЦТ тела.

Второй метод позволяет тестировать и тренировать у человека навык координации движений ЦТ тела с внешними стимулами. В соответствии с данным методом испытуемый, стоя на платформе в вертикальной позе, должен как можно более точно синхронизировать движения

ЦТ своего тела с предъявляемой ритмической последовательностью визуальных или звуковых стимулов, получая при этом в реальном масштабе времени информацию о текущем положении опорной поверхности платформы. На основании сопоставления зарегистрированных перемещений опорной поверхности платформы с заданной ритмической последовательностью сигналов можно судить о способности испытуемого координировать движения ЦТ своего тела с внешними стимулами.

Для выработки навыков одновременного решения двигательных и когнитивных задач без потери равновесия предложен стабилметрический метод тестирования и тренинга способности человека управлять ЦТ своего тела в условиях когнитивной нагрузки [7]. Отличительной особенностью метода является использование обратной связи по выполнению когнитивного задания, что позволяет осуществлять комплексное восстановление двигательных и когнитивных функций у пациентов с заболеваниями ЦНС и оценивать при этом продуктивность и устойчивость его внимания. Согласно данному методу перед тестированием задают ряд изображений отличающихся друг от друга объектов, например, в виде колец Ландольдта – восьми колец с разрывом в разных местах, и формируют из них случайным образом последовательность, например, в виде матрицы, содержащей более восьми колец из заданного ряда.

Испытуемому, находящемуся на платформе в заданном исходном положении, предъявляют изображение сформированной матрицы объектов и информацию о текущем положении опорной поверхности платформы и после предъявления изображения одного из заданных объектов, дают ему задание, руководствуясь сигналами БОС, в течение времени T тестирования путем определенных движений ЦТ тела как можно быстрее построчно обойти матрицу объектов, которые при этом последовательно подсвечиваются, и отметить все объекты, идентичные предъявленному объекту. В ходе тестирования регистрируют количество N пройденных объектов и количество n ошибок, которыми считаются пропущенные и неправильно отмеченные объекты, а после выполнения испытуемым задания оценивают продуктивность S внимания по формуле: $S = (K_1 N - K_2 n) / T$, где K_1 и K_2 – коэффициенты, которые зависят от сложности изображений объектов и сложности движений, посредством которых испытуемый отмечает объекты. По изменению показателя продуктивности S в пределах времени тестирования определяется показатель устойчивости внимания испытуемого.

Экспериментальная установка

На рис. 3 приведена структурная схема экспериментальной установки, с использованием которой апробированы предлагаемые методы функционального биоуправления. Экспериментальная установка содержит платформу с датчиками перемещений опорной плиты, компьютер с блоком программных модулей тестирования двигательных и когнитивных функций и систему визуальной и акустической БОС отклонению опорной плиты от горизонтального положения.

Программное обеспечение (ПО) экспериментальной установки выполнено в среде Borland Delphi 7 и обеспечивает комплексный подход к тестированию и тренингу способности человека произвольно управлять позой своего тела. В состав ПО входит база данных и пять программных модулей: «Равновесие», «Реакция», «Воспроизведение», «Ритм» и «Внимание». ПО позволяет: установить режим обратной связи (визуальный и/или акустический); сформировать количественную оценку тестируемой функции; сохранить информацию о результатах тестирования в базе данных; отразить динамику показателя тестируемой функции.

Программный модуль «Равновесие» предназначен для тестирования и тренинга функции равновесия человека с использованием визуальной и/или акустической БОС. Программный модуль «Реакция» предназначен для тестирования и тренинга у человека навыка своевременного реагирования на внешние стимулы изменением положения ЦТ своего тела в заданных направлениях. Программный модуль «Воспроизведение» предназначен для тестирования и тренинга способности человека воспроизводить заданную траекторию движения ЦТ тела, руководствуясь сигналами БОС. Программный модуль «Ритм» предназначен для тестирования и тренинга способности человека синхронизировать свои двигательные действия с внешними сигналами. Программный модуль «Внимание» предназначен для тестирования и тренинга способности человека управлять ЦТ своего тела в условиях когнитивной нагрузки.

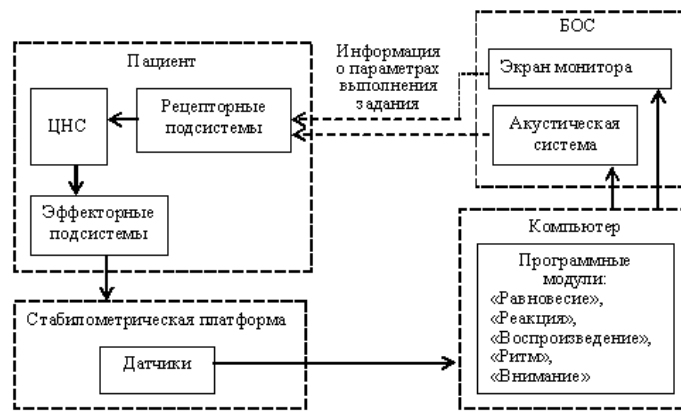


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки [6]

Апробация разработанных методов функционального биоуправления проводилась (с участием специалистов Института физиологии НАН Беларуси и кафедры неврологии и нейрохирургии БелМАПО) во 2-м неврологическом отделении УЗ «5-я городская клиническая больница г. Минска» [8, 9]. Для оценки эффективности предлагаемых технических решений для восстановления устойчивости вертикальной позы у пациентов с заболеваниями ЦНС анализировалась динамика стабилметрических показателей двигательных и когнитивных функций, связанных с устойчивостью вертикального положения тела человека, и рассчитывался показатель эффективности, отражающий улучшение средних значений отдельных показателей в процентах по отношению к их инициальным значениям. Контрольную группу составили 23 добровольца (средний возраст 35,6 года; мужчин – 16, женщин – 7). Группу пациентов составили 30 человек (средний возраст 61,7 года; мужчины), перенесших ишемический или геморрагический инсульт. Испытуемым проводили 6 сеансов тренировок с использованием визуальной БОС. Динамика стабилметрических показателей исследуемых функций у пациентов и здоровых испытуемых приведена в таблице.

Значения показателей исследуемых функций у пациентов и здоровых испытуемых до и после тренинга с использованием соответствующих программных модулей

Показатели функций	Группа пациентов			Группа здоровых испытуемых		
	До тренинга	После тренинга	Эффективность %	До тренинга	После тренинга	Эффективность %
Равновесие (отн. ед.)	0,06–0,18	0,09–0,40	47	0,52–0,74	0,70–0,95	33,8
Реакция (с)	1,90–1,69	1,42–1,06	26,8	0,88–0,73	0,72–0,47	34,7
Воспроизведение (отн. ед.)	0,17–0,31	0,28–0,50	18,4	0,61–0,75	0,84–0,97	29,6
Ритм (отн. ед.)	0,09–0,21	0,18–0,46	42,3	0,65–0,76	0,90–1,00	32
Внимание (отн. ед.)	0,05–0,14	0,12–0,27	45,4	0,47–0,64	0,78–0,97	38,9

Положительная динамика приведенных показателей свидетельствует о том, что разработанные методы являются достаточно эффективным средством реабилитации пациентов с заболеваниями ЦНС. На рис. 4 приведены результаты тренинга пациента.

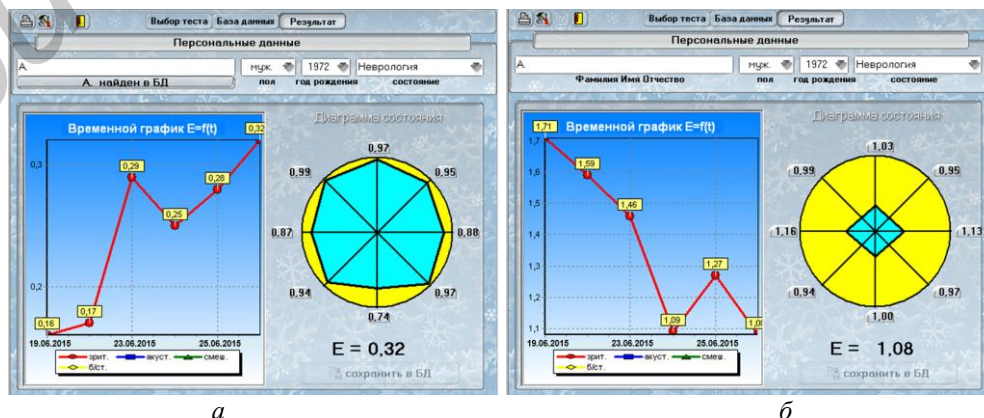


Рис. 4. Динамика показателя удержания равновесия (а) и среднего времени реакции (б)

Заклучение

Разработаны стабилметрические методы реабилитации пациентов с нарушенной устойчивостью вертикальной позы, основанные на тренировке способности человека произвольно управлять ЦТ своего тела в ходе выполнения специальных двигательных-когнитивных задач с использованием платформы балансирующего типа с БОС по отклонению опорной поверхности платформы от горизонтального положения. Предложенные методы позволяют тренировать навыки удержания равновесия, своевременного реагирования на внешние стимулы, точного воспроизведения пространственных и временных характеристик заданного движения и одновременного решения двигательных и когнитивных задач без потери равновесия. Совокупность разработанных методов создает основу для развития методологии создания биотехнических систем реабилитации пациентов с заболеваниями ЦНС, основанных на использовании стабилметрических платформ с неустойчивой опорной поверхностью и БОС по ее положению, а также расширения функциональных возможностей и областей применения.

STABILOMETRIC METHODS FOR TESTING AND TRAINING OF HUMAN BODY BALANCE

V.A. DUBOVSKY

Abstract

The methods for the rehabilitation of patients with neurological disorders based on an unstable platform with audio-visual feedback of the support surface inclination are proposed. They allow the patients to train their ability to control center of gravity during specific dynamic tasks such as maintaining equilibrium, quick reaction, movement reproduction, rhythm synchronization, and simultaneous execution motor and cognitive tasks. A new postural control training system for patients with neurological disorders has been developed. This system equipped with audio-visual feedback of the support surface inclination and provides a complex approach to improving control of posture in subjects with motor and cognitive disorders.

Keywords: stabilometry, rehabilitation, postural stability, biofeedback.

Список литературы

1. Черникова Л.А., Устинова К.И., Иоффе М.Е. и др. // Бюллетень СО РАМН. 2004. № 3. С. 85–91.
2. Устинова К.И., Черникова Л.А., Иоффе М.Е. и др. // Журнал высшей нервной деятельности. 2000. Т. 50, вып. 3. С. 421–433.
3. Horak F.B. // Restorative Neurology and Neuroscience. 2010. Vol. 28. P. 57–68.
4. Piao Y.-J., Tae-Kyu Kwon, Dong-Wook Kim et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. 2009. Vol. 23. P. 324–334.
5. Слива С.С. // Медицинская техника. 2005. № 1. С. 32–36.
6. Dubovsky V.A., Mironovich G.K. Rehabilitation: Practices, Psychology and Health. Nova Science Publishers, Inc. / Ed. R. Lagana and S. M. Esposito. NY, 2012. Ch. 5. P. 113–124.
7. Дубовский В.А. // Сб. науч. ст. IX Междунар. науч.-техн. конф. «Медэлектроника-2015. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии». Минск, 4–5 декабря 2015 г. С. 72–73.
8. Дубовский В.А. Способ оценки функции равновесия человека / Патент РБ № 17473.
9. Дубовский В.А., Кульчицкий В.А., Кистень О.В., Семашко В.В. Способ оценки функции равновесия у человека / Патент РБ № 14729.
10. Дубовский В.А., Маньшин Г.Г., Кульчицкий В.А., Миронович Г.К., Рубахова В.М. Способ оценки координации движений человека / Патент РБ № 17342.
11. Дубовский В.А. Способ оценки координации движений человека / Патент РБ № 17439.
12. Рубахова В.М., Евстигнеев В.В., Кистень О.В. и др. // Новости медико-биологических наук. 2009. № 3. С. 107–111.
13. Рубахова В.М., Пономарев В.В., Дубовский В.А. // Тез. докл. междунар. научн. конф. «Кровообращение в норме и при патологии – от Гарвея до трансплантации сердца». Минск, 16–17 октября 2014 г. / Новости медико-биологических наук. 2014. № 3. С. 47–48.