

УДК 616-71:616.728.48:004.42

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВЫХ ПЛАТФОРМ И БАЛАНСИРОВОЧНЫХ ДИСКОВ В ДИАГНОСТИКЕ НАРУШЕНИЙ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Глушаченко Н.С., магистрант; Деменковец Д.В., ст. преподаватель

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Бранцевич П.Ю. – д-р техн. наук, профессор

Аннотация. Проведен сравнительный анализ классической стабилотрии на стационарной силовой платформе и инструментальной оценки равновесия с использованием портативного балансировочного диска. Показано, что нестабильная опора эффективнее для выявления скрытых нарушений голеностопного сустава, так как обеспечивает специфическую динамическую нагрузку.

Ключевые слова. Нарушения опорно-двигательного аппарата, голеностопный сустав, стабилотрия, силовая платформа, балансировочный диск, акселерометр, постуральный контроль, реабилитация, биологическая обратная связь.

Современные подходы к диагностике и реабилитации нарушений опорно-двигательного аппарата требуют применения высокоточных методов оценки постурального контроля. Важнейшим биомеханическим звеном, обеспечивающим компенсацию отклонений центра тяжести и удержание равновесия, является голеностопный сустав. Различные патологии данного узла, такие как хроническая нестабильность, последствия перенесенных травм или длительной иммобилизации конечности, приводят к выраженным динамическим ортопедическим нарушениям и сбоям в координации движений.

Для количественной оценки процесса управления позой в клинической практике традиционно применяется метод стабилотрии, фиксирующий колебания центра давления пациента. Тем не менее, классические стабилотрические исследования проводятся в условиях статической стойки на неподвижной опоре. Такой подход информативен для оценки работы вестибулярного аппарата, однако он зачастую не позволяет выявить скрытые функциональные нарушения голеностопа, поскольку сустав не подвергается специфической динамической нагрузке.

Для выявления дефицита подвижности и проблем с управлением голеностопным суставом необходимо создание условий управляемой нестабильности. Эта задача решается путем интеграции в диагностический процесс балансировочных дисков и проведения двигательно-когнитивных тестов с использованием биологической обратной связи, где пациент вынужден целенаправленно изменять углы наклона голеностопа. В связи с развитием портативных акселерометрических систем возникает потребность в четком разграничении диагностического потенциала различного оборудования.

Традиционная силовая платформа представляет собой стационарный аппаратно-программный комплекс, предназначенный для регистрации положения и колебаний общего центра давления (ЦД) человека, находящегося в статической вертикальной стойке на плоской горизонтальной опоре. Данный метод, известный как классическая стабилотрия, позволяет объективно и количественно оценить стратегии поддержания равновесия, и выявить отклонения в работе постуральной системы.

При проведении исследования высокочувствительные датчики платформы фиксируют координаты смещения ЦД в двумерной системе. На основе полученного массива координат специализированное программное обеспечение вычисляет ряд характеристик позы: общую длину пройденного пути, среднюю скорость перемещения ЦД, площадь доверительного эллипса, а также показатели дисперсии и среднеквадратического отклонения.

Несмотря на статус эталонного инструмента для объективной оценки постурального контроля, стационарные силовые платформы обладают рядом существенных эксплуатационных и клинических ограничений. К числу основных инфраструктурных недостатков относятся высокая стоимость оборудования, его значительные габариты и жесткая привязка к специализированным стационарным медицинским учреждениям [1].

С биомеханической и клинической точек зрения, исследования на статичной жесткой опоре ориентированы преимущественно на оценку вестибулярного аппарата и глобальных механизмов удержания равновесия. При проведении статических проб голеностопный сустав не подвергается выраженной динамической нагрузке и не совершает активных угловых перемещений с большой амплитудой. В результате стационарные силовые платформы оказываются недостаточно чувствительными инструментами для оценки реальной подвижности голеностопа и выявления его скрытой функциональной нестабильности [2].

В качестве современной альтернативы стационарным системам все более широкое применение находят портативные аппаратно-программные комплексы, интегрируемые в балансировочные диски [1]. Ключевым биомеханическим отличием данного подхода является создание условий управляемой нестабильности. При нахождении на качающейся платформе пациент вынужден непрерывно балансировать, что обеспечивает целенаправленную динамическую нагрузку на голеностопный сустав и активно включает в работу локальный мышечно-связочный аппарат [2]. Пример балансировочного диска, используемого в этих целях представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Балансировочный диск

С технической точки зрения сбор данных на балансировочном диске кардинально отличается от принципов работы силовой платформы. Вместо регистрации пространственных координат центра давления в миллиметрах, диск использует встроенные акселерометры для вычисления углов наклона опоры в градусах [1].

Актуальность и высокая эффективность применения акселерометрических датчиков в постурографии подтверждаются рядом независимых исследований. В работе Dolinay et al. (2014) обоснована возможность создания компактных и экономически доступных диагностических устройств на базе акселерометров. Исследователи продемонстрировали, что портативные модули способны с высокой точностью регистрировать наклоны платформы и транслировать данные в режиме реального времени, выступая полноценной диагностической альтернативой дорогостоящему стационарному оборудованию [1].

Клиническая значимость применения нестабильных платформ именно в ортопедической практике была детально доказана в исследовании Laessoe et al. (2019). Использование инструментального балансировочного диска позволило достоверно дифференцировать здоровых испытуемых и пациентов, страдающих функциональной нестабильностью голеностопа, опираясь на показатели вариативности угла наклона в медиолатеральном направлении. Это подтверждает тот факт, что регистрация угловых отклонений в условиях динамической нестабильности является высокочувствительным методом выявления специфических суставных патологий, которые могут оставаться незамеченными при статических тестах [2].

Сопоставление классических силовых платформ и нестабильных поверхностей выявляет как принципиальные различия в их биомеханическом воздействии, так и существенные сходства в методологии обработки регистрируемых сигналов. Понимание этих особенностей критически важно для выбора оптимального диагностического инструмента [4].

Оба типа оборудования предназначены для количественной оценки процесса управления позой и поддержания равновесия. Несмотря на разную физическую природу получаемых данных, методы их математической обработки имеют высокую степень совместимости. Базовые стабилметрические метрики, изначально разработанные для анализа координат в миллиметрах, математически тождественны при применении к угловым координатам [3]. Кроме того, обе системы могут эффективно интегрироваться с технологиями биологической обратной связи (БОС) для проведения двигательных когнитивных тестов, где пациент осознанно управляет своим центром тяжести.

Фундаментальная разница между устройствами заключается в типе измеряемой величины и характере создаваемой биомеханической нагрузки.

Сравнение устройств проведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение силовой платформы и балансировочного диска

	Силовая платформа	Балансировочный диск
Измеряемый параметр	ЦД в миллиметрах от центра	Углы наклона от положения равновесия
Характер позы	Статическая	Динамическая (подвижная)
Биомеханический фокус	Вестибулярный аппарат	Голеностопный сустав
Портативность	Высокая	Низкая

Опираясь на выявленные преимущества методов динамической постурографии, был спроектирован и реализован портативный координационно-реабилитационный комплекс. Решение состоит из аппаратного измерительного модуля и специализированного программного обеспечения, функционирующего как система поддержки принятия врачебных решений.

Аппаратная часть комплекса представляет собой компактный встраиваемый блок, который может быть установлен на балансировочный диск произвольной формы и размера. Ключевым сенсором выступает акселерометр, непрерывно регистрирующий углы наклона, отражающие отклонения платформы от горизонтальной плоскости.

Для корректной визуализации движений пациента алгоритм программного средства выполняет математическое преобразование получаемых угловых координат в оконную систему координат устройства отображения. Предварительно проводится обязательная калибровка: программное центрирование осей для нивелирования аппаратных погрешностей датчика и фиксация индивидуальных максимальных углов наклона диска.

Особое внимание при разработке было уделено проблеме низкой мотивации пациентов детского возраста при выполнении рутинных ортопедических упражнений. Для повышения вовлеченности в процесс реабилитации внедрен метод биологической обратной связи (БОС) с элементами геймификации. Пациент, балансируя на нестабильной платформе, управляет на экране монитора визуальным объектом (курсором), стараясь переместить его в заданную мишень и удержать там фиксированное время [5].

Проведенный сравнительный анализ демонстрирует, что традиционная статическая стабилметрия и инструментальная оценка на балансировочных дисках являются не взаимоисключающими, а взаимодополняющими методами количественной оценки постурального контроля.

Силовая платформа остается инструментом выбора для базовой неврологической диагностики, оценки статического равновесия, мониторинга возрастных изменений вестибулярного аппарата и проведения классических стабилметрических проб в условиях лаборатории.

В это же время балансировочный диск наиболее востребован в травматологии, ортопедии и спортивной медицине. Этот метод оптимален для выявления скрытых динамических нарушений голеностопного сустава, реабилитации после травм или длительной иммобилизации. Автономность таких комплексов делает их крайне перспективными для удаленного мониторинга процесса восстановления пациентов на дому, а высокая вариативность движений позволяет использовать их для интерактивных тренировок в педиатрической практике.

Создание управляемой нестабильности позволяет акцентированно воздействовать на голеностопный сустав, выявляя его скрытую функциональную нестабильность и моторный дефицит, которые зачастую не обнаруживаются в статических пробах.

Разработанный аппаратно-программный комплекс успешно интегрирует преимущества нестабильных портативных платформ и современных информационных технологий. Внедрение двигательного-когнитивных тестов с биологической обратной связью в игровой форме решает критическую проблему низкой мотивации у детей при выполнении однотипных реабилитационных упражнений.

Внедрение подобных портативных систем поддержки принятия решений предоставляет врачам-ортопедам объективный оцифрованный инструмент для мониторинга динамики восстановления. Автономность и экономическая доступность комплекса делают его перспективным решением как для стационарного лечения, так и для непрерывного удаленного мониторинга пациентов в амбулаторных условиях.

Список использованных источников:

1. Dolinay J. et al. Posturography device based on accelerometer // *Int J Syst Appl Eng Develop.* – 2014. – Т. 8. – С. 155-162.
2. Laessle U. et al. Evaluation of functional ankle instability assessed by an instrumented wobble board // *Physical therapy in sport.* – 2019. – Т. 35. – С. 133-138.
3. Scoppa F. et al. Clinical stabilometry standardization: basic definitions–acquisition interval–sampling frequency // *Gait & posture.* – 2013. – Т. 37. – №. 2. – С. 290-292.
4. Гаже П.-М., Вебер Б. *Постурология. Регуляция и нарушения положения тела человека.* – СПб.: СПбМАПО, 2008. – 316 с.
5. Девялтовская М.Г., Платонов А.В., Козловский Д.А. *Биологическая обратная связь с визуальным каналом и стабилметрией: учеб.-метод. пособие.* – Минск: БелМАПО, 2021. – 23 с.

UDC 616-71:616.728.48:004.42

A COMPARATIVE ANALYSIS OF FORCE PLATFORMS AND WOBBLE BOARDS IN DIAGNOSING DISORDERS OF THE MUSCULOSKELETAL SYSTEM

Glushachenko N.S., master's student; Demenkovets D.V., senior lecturer

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Brancevich P.J. – Doctor of Technical Sciences, Professor

Annotation. A comparative analysis of classical stabilometry using a stationary force platform and instrumental balance assessment using a portable balance disc was conducted. The results show that an unstable stance is more effective for detecting hidden ankle joint disorders, as it provides a specific dynamic load.

Keywords. Musculoskeletal disorders, ankle joint, stabilometry, force platform, balance disc, accelerometer, postural control, rehabilitation, biofeedback.