

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-70-83>



УДК 617.58

Система сбора и оценки нагрузочной информации о биоэлектрических сигналах мышечного аппарата стопы человека с ДЦП

С. М. Яцун¹, А. Н. Рукавицын² ✉, Е. Н. Политов²

¹ Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: alruk75@mail.ru

Резюме

Целью исследования работы является разработка системы биомеханического исследования объемов движения в стопе и голеностопном суставе для диагностики больных ДЦП при оценке качества реабилитационных мероприятий. Исследован процесс создания компьютерной системы диагностики больных с нарушениями двигательных функций нижних конечностей, которая оснащается специальными биоизмерительными устройствами, обеспеченными специализированными алгоритмами обработки полученной информации, обуславливается необходимостью научных исследований, направленных на разработку методов и средств комплексной оценки результатов физической реабилитации с использованием биомедицинских показателей.

Методы. Использованы методы кинематического анализа движений в голеностопном суставе, осуществлены динамический и статический анализы сил опорных реакций стопы нижних конечностей.

Результаты. Разработана система регистрации движений на основе электронного гониометра, реализованного на основе резистивного потенциометра В10К. Определение абсолютных углов поворота звеньев диагностической системы осуществлено при помощи датчика ускорения ММА7361, который содержит установленные на одной пластине кремния три микромашинных конденсатора. В процессе исследований изменение емкостей микромашинных конденсаторов позволяет обеспечивать фиксацию регистрируемой величины на каждом из направлений. Проходящие через низкочастотные фильтры и каскады температурной компенсации сигналы поступают на соответствующие выходы X, Y и Z. Получаемые ангиограммы позволяют оценить походку исследуемого пациента по двум классам – в норме и при наличии патологии.

Заключение. Разработана система формирования и оценки биоэлектрических сигналов, получаемых с применением мышечного аппарата стопы пациентов с ДЦП, собранная на платформе платы управления Arduino UNO и персонального компьютера общего назначения. Разработанная система позволяет проводить регистрацию биоэлектрических сигналов с последующей их обработкой с помощью персонального компьютера и принятием диагностических решений.

Ключевые слова: биоэлектрический сигнал; цифровая обработка сигнала; диагностическая система; микроконтроллер; акселерометр; тензометрия; принципиальная схема; опорная реакция.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках реализации Федеральной программы трансформации вузов «Приоритет – 2030».

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Яцун С. М., Рукавицын А. Н., Политов Е. Н. Система сбора и оценки нагрузочной информации о биоэлектрических сигналах мышечного аппарата стопы человека с ДЦП // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 70–83. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-70-83>.

Поступила в редакцию 20.10.2023

Подписана в печать 15.11.2023

Опубликована 22.12.2023

A System for Collecting and Evaluating Load Information about Bioelectric Signals of the Muscular Apparatus of the Foot of a Person with Cerebral Palsy

Svetlana M. Yatsun¹, Alexander N. Rukavitsyn² ✉, Evgeny N. Politov²

¹ Kursk State University
33 Radishcheva Str., Kursk 305000, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: alruk75@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a system of biomechanical investigation of the volume of movement in the foot and ankle joint for the diagnosis of patients with cerebral palsy in assessing the quality of rehabilitation measures. The process of creating a computer diagnostic system for patients with impaired motor functions of the lower extremities, which is equipped with special bio-measuring devices provided with specialized algorithms for processing the information obtained, is investigated due to the need for scientific research aimed at developing methods and tools for a comprehensive assessment of the results of physical rehabilitation using biomedical indicators.

Methods of kinematic analysis of movements in the ankle joint were used, dynamic and static analyses of the forces of the supporting reactions of the foot of the lower extremities were carried out.

Results. A motion detection system based on an electronic goniometer implemented on the basis of a B10K resistive potentiometer has been developed. The determination of the absolute rotation angles of the links of the diagnostic system was carried out using the MMA7361 acceleration sensor, which contains three micromachine capacitors mounted on one silicon plate. In the course of research, changing the capacitances of micromachine capacitors makes it possible to fix the recorded value in each direction. Signals passing through low-frequency filters and temperature compensation cascades are sent to the corresponding outputs X, Y and Z. The obtained angulograms allow us to evaluate the gait of the studied patient in two classes – normal and in the presence of pathology.

Conclusion. A system for the formation and evaluation of bioelectric signals obtained using the muscular apparatus of the foot of patients with cerebral palsy, assembled on the platform of the Arduino UNO control board and a general-purpose personal computer, has been developed. The developed system makes it possible to register bioelectric signals with their subsequent processing using a personal computer and making diagnostic decisions.

Keywords: bioelectric signal; digital signal processing; diagnostic system; microcontroller; accelerometer; strain gauge; circuit diagram; reference reaction.

Funding: The study was carried out as part of the implementation of the federal program for the Transformation of universities "Priority – 2030".

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Yatsun S. M., Rukavitsyn A. N., Politov E. N. A System for Collecting and Evaluating Load Information About Bioelectric Signals of the Muscular Apparatus of the Foot of a Person with Cerebral Palsy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 70–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-70-83>.

Received 20.10.2023

Accepted 15.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Несмотря на успехи нейронаук и расширяющиеся технические возможности, проблема комплексной диагностики пациентов с детским церебральным параличом (ДЦП) является одной из важнейших в ортопедии. Деформации стоп являются наиболее частой патологией опорно-двигательного аппарата у таких больных. Патологические установки стоп выявляются уже в период новорожденности и в дальнейшем закрепляются, трансформируясь в тонические и фиксированные контрактуры, которые приводят к закономерному нарушению соотношений в суставах стопы, нарушению архитектоники и деформации костей стопы.

Проблему правильной диагностики больных с двигательными нарушениями, без сомнения, можно отнести к одной из важных медико-социальных проблем здравоохранения [1; 2; 3; 4]. При назначении реабилитационных мероприятий важно определить степень наличия у больного реабилитационного потенциала. Успешность решения этой

проблемы определяется, прежде всего, наличием материально-технической базы, оснащенной специальными биоизмерительными устройствами, обеспеченными развитыми программными алгоритмами [5; 6]. С внедрением в практическую медицину методов цифровой обработки сигналов и компьютерного анализа появляется качественно новый подход, позволяющий расширить диагностические возможности оценки поступающей информации. Все это обуславливает необходимость дальнейших научных исследований, направленных на разработку методов и средств комплексной оценки результатов физической реабилитации с использованием биомедицинских и электрофизиологических показателей.

Поскольку основным критерием восстановления нарушенных функций поврежденных конечностей является движение, функциональная диагностика должна включать в первую очередь биомеханические и антропометрические измерения. Для количественной оценки двигательной функции в суставах обычно применяют гониометрию и

динамометрию, которые позволяют регистрировать только один параметр движения [7].

Материалы и методы

Для проведения биомеханического обследования стопы и голеностопного сустава разрабатывается специальная биоизмерительная система, предназначенная для определения объемов движения в суставах нижних конечностей больных ДЦП при проведении диагностики состояния. Данная система сбора и оценки нагрузочной информации о биоэлектрических сигналах мышечного аппарата стопы человека регистрирует биоэлектрические сигналы, поступающие от опорно-двигательного аппарата нижних конечностей человека для последующей обработки с помощью ЭВМ. Система включает в себя опорные модули, которые крепятся к стопе и голени обследуемого пациента при помощи крепежных ремней. Опорные модули включают в себя узлы «голени» и «стопы», которые крепятся на соответствующих участках человеческого тела. Данные узлы связаны между собой цилиндрическими шарнирами, оснащенными потенциометрами резистивного типа, которые позволяют проводить измерение относительного угла между подвижными звеньями. Дополнительно, на узле «голени» установлены акселерометры, позволяющие получать данные о положении исполнительных модулей и, соответственно, конечностей в пространстве в абсолютных величинах. На

опорных звеньях «стопы», которые непосредственно контактируют со стопой пациента, в точках возможного контакта установлены три тензометрических датчика давления.

Регистрация сигналов в представленной системе (рис. 1) осуществляется при помощи микроконтроллера ATmega 328, собранного на платформе платы управления (сбора данных) Arduino UNO [8; 9]. Данная плата содержит кварцевый генератор 16 МГц, силовой разъем, разъемы USB и ICSP и кнопку перезагрузки. Платформа также имеет 6 аналоговых входов и 14 цифровых входов/выходов. Причем 6 из 14 цифровых входов/выходов применяются как выходы ШИМ. Аналоговые входы (A0...A5) имеют разрешение 10 бит каждый, что позволяет принимать 1024 различных значения. Диапазон измерения выводов относительно «земли» изменяется от 0 до 5В. При этом предел верхнего значения может быть изменен при помощи функции «analogReference» (вывод AREF).

Представленная система дает возможность регистрировать и обработать количественные параметры, которые определяют характер совершаемых локомоций обследуемого пациента [10]. Система позволяет осуществлять анализ сил опорных реакций как в статике, так и динамике, а также проводить кинематический анализ локомоторных движений в голеностопном суставе. Регистрация локомоций осуществляется при помощи электронного гониометра [11].

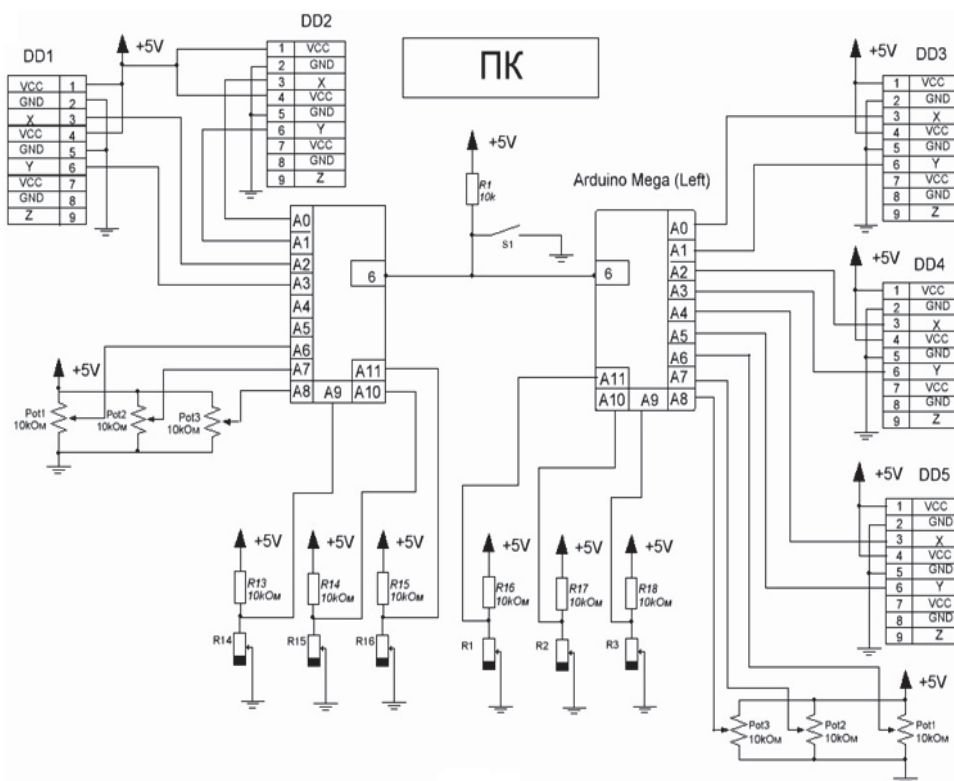


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема системы сбора и оценки нагрузочной информации о биоэлектрических сигналах мышечного аппарата человека

Fig. 1. Schematic diagram of the system for collecting and evaluating load information about bioelectric signals of the human muscular apparatus

Роль данного измерителя выполняет резистивный потенциометр В10К, выходная характеристики которого была получена экспериментальным путем (рис. 2, а). Определение абсолютных углов поворота звеньев «голени» осуществляется при помощи акселерометра (датчика ускорения) ММА7361. Данный датчик имеет три микромашинных конденсатора, установленные на одной пластине кремния, изменение емкости которых позволяет обеспечивать функционирование данного акселерометра. Каждый конденсатор отвечает за одно из направлений – X, Y и Z. Акселерометр ММА7361 позволяет выполнять кинематический анализ сразу в трех

плоскостях. Ускоренное движение приводит к появлению инерционных сил, которые оказывают воздействие на подвижные обкладки конденсаторов. Данное воздействие приводит к изменению величины емкости конденсатора, что приводит к изменению передаваемого напряжения. Поступаемые в каждый из трёх каналов сигналы затем усиливаются, пропускаются через низкочастотные фильтры и каскады компенсации температуры. Обработанные таким образом сигналы поступают на соответствующие выходы X, Y и Z. Нормированные сигналы акселерометра на двух выходах X, Y были получены экспериментально и представлены ниже (рис. 2, б).

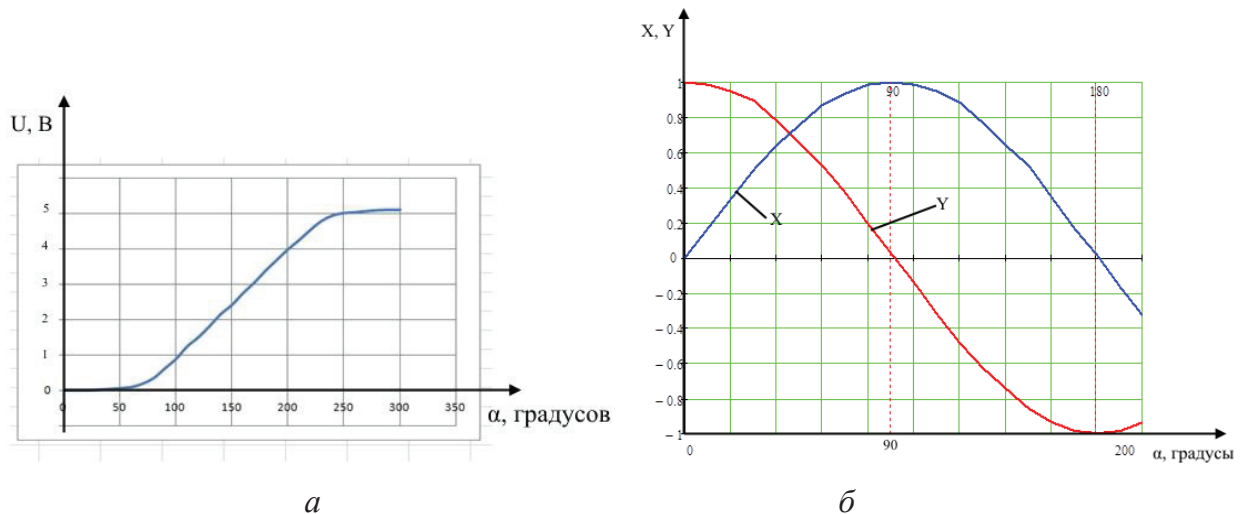


Рис. 2. Выходные характеристики: а – выходная характеристика потенциометра; б – нормированные выходные сигналы акселерометра MMA7361

Fig. 2. Output characteristics: а – output characteristic of the potentiometer; б – normalized output signals accelerometer MMA7361

Определение опорных реакций стопы пациента проводится при помощи специальных измерительных платформ, которые установлены на силовых платформах «стопы» измерительной системы. Измерение сил нормальной реакции [12], возникающей в точках

контакта стопы пациента с опорной поверхностью, при ходьбе или в неподвижном состоянии, осуществляется при помощи трех тензометрических датчиков давления Force Sensitive Resistor 0,5. Рассмотрим схему проведения измерения нормальной реакции (рис. 3).

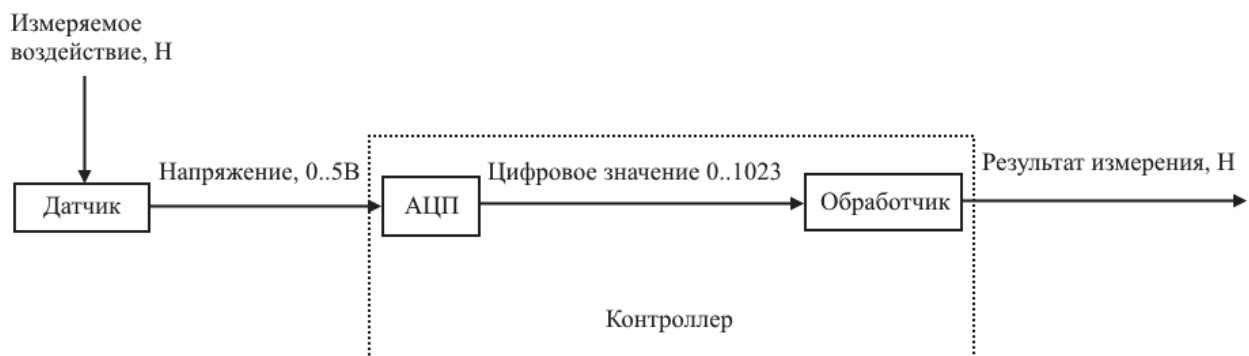


Рис. 3. Схема измерения нормальной реакции стопы

Fig. 3. The scheme of measuring the normal reaction of the foot

Функция обработчика, связывающая величину выходного напряжения, поступающего с датчика давления, с величиной прикладываемого к нему

усилия, также были определены экспериментально. Для этого создавалась нагрузка на датчик грузами различной массы, что дало возможность определить

зависимость выходного сигнала с датчика от массы установленного груза [13]. Полученная экспериментальная зависимость аппроксимировалась функцией

ей $f(x) = (a/(\sigma \cdot x + b)) + c$, а затем определялись коэффициенты аппроксимации (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты функции аппроксимации

Table 1. Coefficients of the approximation function

Коэффициент	Значение
a	$9,95 \cdot 10^5$
σ	12,8132
b	1000
c	28

Линеаризации выходного сигнала с датчика проводилась при помощи функции

$$u(x) = (a/(\sigma \cdot (y(x) - c)) - b/c,$$

где $u(x)$ – линеаризованный сигнал; $y(x)$ – выходной сигнал с датчика.

Рассмотрим результаты обработки экспериментальных данных (рис. 4).

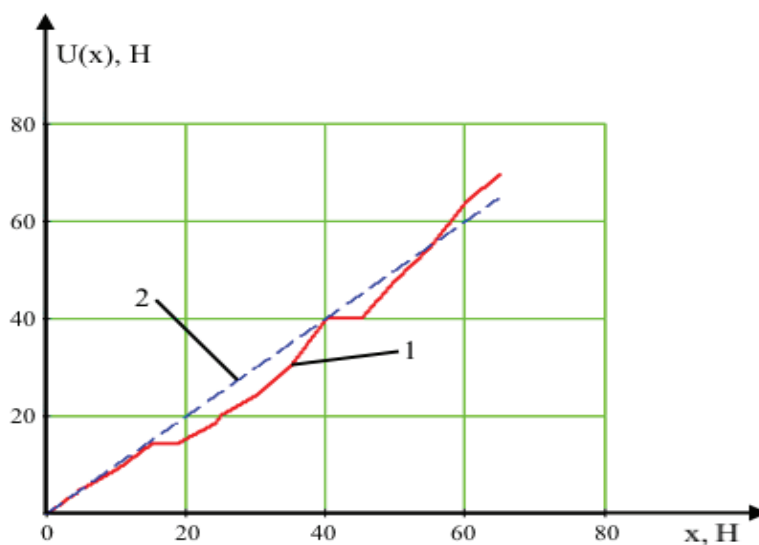


Рис. 4. Зависимость линеаризованного сигнала $u(x)$: 1 – обработка экспериментальных данных; 2 – идеальная линейная функция датчика $y(x) = x$

Fig. 4. Dependence of the linearized signal $u(x)$: 1 – processing of experimental data; 2 – ideal linear function of the sensor $y(x) = x$

Результаты и их обсуждение

Разрабатываемая измерительная система дает возможность получить кинематические зависимости, характеризующие

локомоции в голеностопном суставе в процессе движения, а также позволяет провести анализ опорных реакций стопы при переходе из положения «сидя» к

положению «стоя». Основными задачами проведенных исследований стали ангулография голеностопного сустава и тензометрирование (получение временных зависимостей нормальных реакций в точках опоры) для пациентов с нарушениями функций нижних конечностей. Ангулография, как и гониометрия (метод регистрации относительных движений частей тела), позволяет существенно расширить представления о характере и степени поражения опорно-двигательного аппарата, обеспечить объективный контроль над процессами лечения и реабилитации. Получаемые ангулограммы позволяют оценить походку в норме и при наличии той или

иной патологии. Кроме того, данная информация может быть полезна при оценке эффективности примененного лечения [13; 14].

Тензометрирование и подография, т. е. регистрация электрических сигналов при соприкосновении стопы пациента с опорной поверхностью, также были реализованы с помощью представленной биоизмерительной системы, которая позволяет проводить регистрацию фаз переноса конечности, постановки пятки на опору, переката на всю ступню, отрыва пятки и т. д. Схема расположения датчиков нагрузки при измерении распределения силы давления стопы на опорную поверхность и сама измерительная система представлены (рис. 5).

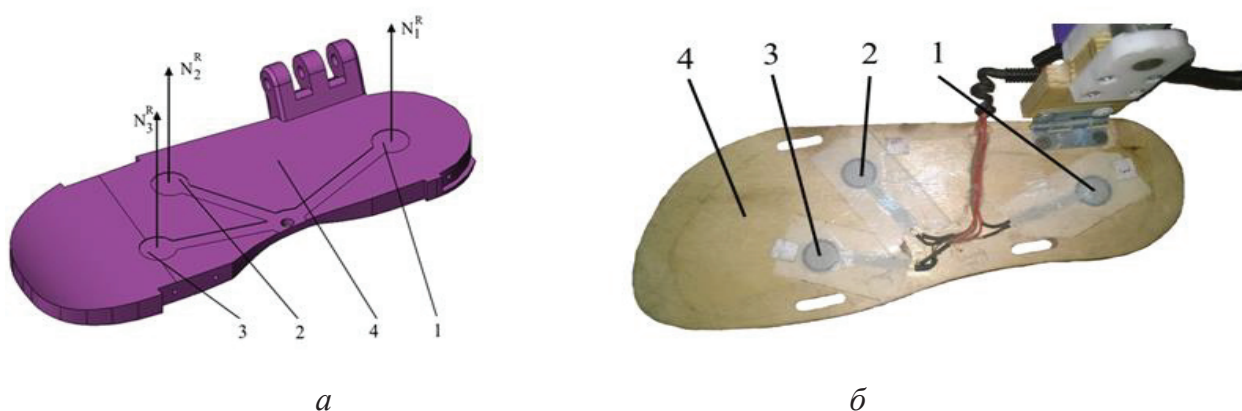


Рис. 5. Схема расположения тензометрических датчиков (а) и физическая реализация биоизмерительной системы (б): 1 – тензодатчик пятки; 2 – тензодатчик средний; 3 – тензодатчик передний; 4 – платформа стопы

Fig. 5. The layout of strain gauges and the physical implementation of the bio-measuring system: 1 – pressure sensor in the heel; 2 – pressure sensor in the middle part of the foot; 3 – pressure sensor in the forefoot; 4 – foot platform

Полученная информация передавалась на персональный компьютер и обрабатывалась по специальному алгоритму [15; 16]. Рассмотрим характер изменения сил давления на рецепторы

биоизмерительной системы при исследовании соприкосновения стопы пациента с опорной поверхностью при переходе из положения «сидя» к положению «стоя» (рис. 6).

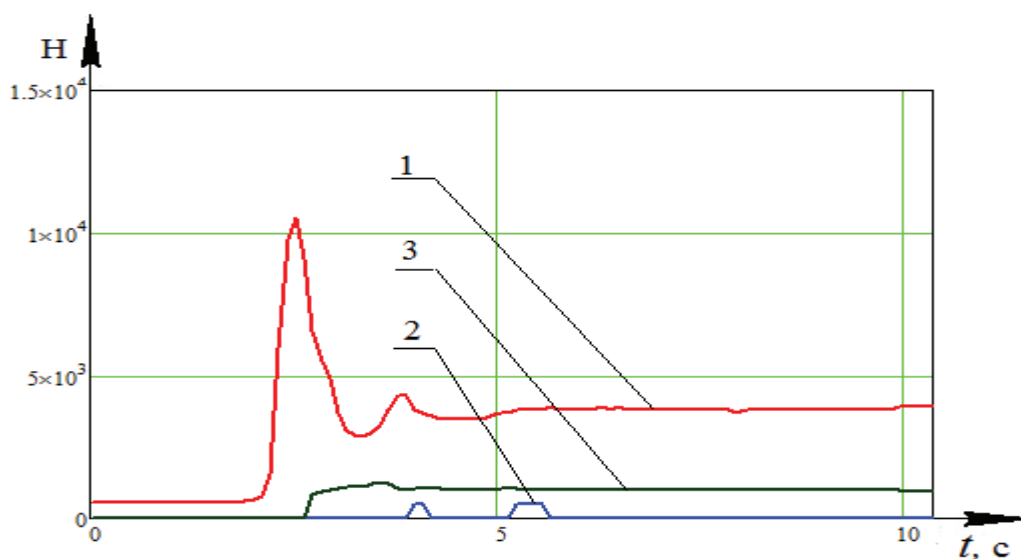


Рис. 6. Тензометрические характеристики стопы, полученные с помощью биоизмерительной системы:
1 – тензодатчик пятки; 2 – тензодатчик средний; 3 – тензодатчик передний

Fig. 6. Tensometric characteristics of the foot obtained using a bio-measuring system:
1 – pressure sensor in the heel; 2 – pressure sensor in the middle part of the foot;
3 – pressure sensor in the front part of the foot

Анализ представленных данных дает возможность утверждать, что опорные реакции неравномерно распределены на некоторой сравнительно небольшой площади контакта между стопой и поверхностью опоры [17; 18]. При выполнении указанного перехода характер распределения изменяется в течение времени опоры: вначале давление оказывается на пятку, затем при постановке всей стопы на опору дополнительно возникает нагрузка в области плюсневых костей [19]. Установлено, что положение максимума давления на стопу меняется при смене темпа и вида совершаемых движений. При этом величина опорных реакций в стопе является своеобразным индикатором, указывающим на одновременное действие всех сил на организм при выполнении локомоций,

что согласуется с опубликованными в [20] исследованиями.

Выводы

Биоэлектрические сигналы широко используются в медицинской практике, и прежде всего для проведения диагностики заболеваний, связанных с нарушением функций опорно-двигательного аппарата человека. В ходе выполнения данного исследования была обоснована структура и разработана система для исследования биоэлектрических сигналов мышечного аппарата стопы пациентов с ДЦП на платформе платы управления Arduino UNO и персонального компьютера общего назначения. Разработанная система позволяет проводить регистрацию биоэлектрических сигналов с последующей их обработкой с помощью персонального компьютера.

Список литературы

1. Медицинские аспекты применения радиолокационных методов обработки сигналов при реализации электрокардиографии сверхвысокого разрешения / К. В. Зайченко, А. А. Кордюкова, Е. П. Логачев, М. Н. Лучкова // Медицинская техника. 2021. Т. 1, № 325. С. 21–24.
2. Эффекты аудиовизуальной стимуляции, автоматически управляемой биопотенциалами мозга и сердца человека / А. И. Федотчев, С. Б. Парин, С. А. Полевая, А. А. Земляная // Физиология человека. 2019. Т. 45, № 5. С. 75–79.
3. Орехова Д. Д., Каримова Е. Д. Ритмическая активность мозга при восприятии медиаконтента и созерцании природы // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2021. Т. 6, № 2. С. 239–244.
4. Изменения биоэлектрической активности мозга при ишемии / Г. В. Придворов, К. Ю. Калитин, А. А. Спасов, О. Ю. Муха // Лекарственный вестник. 2022. Т. 23, № 2 (86). С. 7–16.
5. Баталов А. В., Веселов О. В. Регистрация и обработка сигнала биоэлектрической активности мышц для управления приводом бионического протеза // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 12-2. С. 263–268.
6. Баталов А. В., Веселов О. В. Обработка биоэлектрических сигналов для управления активным экзоскелетом ног // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 5. С. 23–27.
7. Спиркин А. Н., Авдеева Н. В. Выявление патологических состояний по анализу биоэлектрической активности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. Т. 1, № 23. С. 75–84.
8. Журавлёв Д. В., Проводников А. А. Использование шестнадцатиканального комплекса регистрации электроэнцефалограммы для выявления различных изменений электрической активности головного мозга с целью их дальнейшей интерпретации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17, № 5. С. 70–78.
9. Васковская Л. Ф., Гордиевич А. В., Камлач П. В. Многоканальный электрокардиограф с фильтрацией электрокардиограмм методами медиан, Савицкого-Голея и Чебышева // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19, № 6. С. 45–54.
10. Будко Р. Ю., Чернов Н. Н., Будко Н. А. Метод управления устройствами замещения утраченных функций на основе миосигнала и его верификация в реальном масштабе времени // Вестник молодёжной науки России. 2019. № 6. С. 12.

11. Войтенко В. П., Федорова О. А., Ершов Р. Д. Электронная система регистрации и обработки биоэлектрических сигналов // Технические науки и технологии. 2016. Т. 1, № 3. С. 109–115.
12. Смирнова Л. М., Пономаренко Г. Н., Суслев В. Г. Методология и информационно-измерительная система для персонифицированного синтеза протезов нижних конечностей // Информационно-управляющие системы. 2021. № 6. С. 64–74. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-64-74>.
13. Арбиева М. В. Задачи реиннервации и обработки ЭМГ-сигнала в разработке биоэлектрического протеза // Молодежный научный вестник. 2018. Т. 4, № 29. С. 71–77.
14. New approaches to rehabilitation of the ankle joint using a mechanotherapeutic apparatus / S. M. Jatsun, A. S. Jatsun, A. N. Rukavitsyn, E. N. Politov // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52, N 1. P. 37–41.
15. Куст С. Ю., Маркова М. В., Писарева А. В. Разработка алгоритма определения местности в системе управления протезом нижней конечности // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2021. Т. 20, № 2. С. 99–105.
16. Аппаратно-программный комплекс для удаленного мониторинга и контроля состояния беременных женщин / И. П. Корнеева, К. А. Крамарь, Е. А. Семенова, А. М. Сергеев, З. М. Юлдашев // Информационно-управляющие системы. 2021. № 6. С. 21–30. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-21-30>.
17. Pimenov V. I., Pimenov I. V. Interpretation of a trained neural network based on genetic algorithms // Information and Control Systems. 2020. N 6. P. 12–20. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-12-20>.
18. Evaluation of EEG identification potential using statistical approach and convolutional neural networks / A. E. Sulavko, P. S. Lozhnikov, A. G. Choban, D. G. Stadnikov, A. A. Nigrey, D. P. Inivatov // Information and Control Systems. 2020. N 6. P. 37–49. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-37-49>.
19. Зайченко К. В., Гуревич Б. С. Спектральная обработка биоэлектрических сигналов // Медицинская техника. 2021. Т. 1, № 325. С. 12–14.
20. Jatsun S. M., Jatsun A. S., Rukavitsyn A. N. Creation of a biomechatronic orthopedic device for the treatment of flat feet // Biomedical Engineering. 2021. Vol. 54, N 5. P. 361–365.

References

1. Zaichenko K. V., Kordyukova A. A., Logachev E. P., Luchkova M. N. Medicinskie aspekty primeneniya radiolokacionnyh metodov obrabotki signalov pri realizacii elektrokardiografii sverhvyssokogo razresheniya [Medical aspects of the application of radar signal processing methods in the implementation of ultra-high resolution electrocardiography]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2021, vol. 1, no. 325, pp. 21–24

2. Fedotchev A. I., Parin S. B., Polevaya S. A., Zemlyanaya A. A. Effekty audiovizual'noj stimulyacii, avtomaticheski upravlyaemoj biopotencialami mozga i serdca cheloveka [Effects of audio-visual stimulation automatically controlled by biopotentials of the human brain and heart]. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*, 2019, vol. 45, no. 5, pp. 75–79.
3. Orekhova D. D., Karimova E. D. Ritmicheskaya aktivnost' mozga pri vospriyatii mediakontenta i sozercanii prirody [Rhythmic activity of the brain in the perception of media content and contemplation of nature]. *Aktual'nye voprosy biologicheskoy fiziki i himii = Topical Issues of Biological Physics and Chemistry*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 239–244.
4. Pridvorov G. V., Kalitin K. Yu., Spasov A. A., Mukha O. Yu. Izmeneniya bioelektricheskoy aktivnosti mozga pri ishemii [Changes in bioelectric activity of the brain in ischemia]. *Lekarstvennyy vestnik = Medicinal Bulletin*, 2022, vol. 23, no. 2 (86), pp. 7–16.
5. Batalov A. V., Veselov O. V. Registraciya i obrabotka signala bioelektricheskoy aktivnosti myshe dlya upravleniya privodom bionicheskogo proteza [Registration and signal processing of bioelectric activity of muscles to control the drive of a bionic prosthesis]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High-Tech Technologies*, 2020, no. 12-2, pp. 263–268.
6. Batalov A. V., Veselov O. V. Obrabotka bioelektricheskikh signalov dlya upravleniya aktivnym ekzoskeletom nog [Processing of bioelectric signals to control the active exoskeleton of the legs]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High-Tech Technologies*, 2021, no. 5, pp. 23–27.
7. Spirkin A. N., Avdeeva N. V. Vyyavlenie patologicheskikh sostoyanij po analizu bioelektricheskoy aktivnosti [Identification of pathological conditions by analysis of bioelectric activity]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*, 2018, vol. 1, no. 23, pp. 75–84.
8. Zhuravlev D. V., Provodnikov A. A. Ispol'zovanie shestnadcatikanal'nogo kompleksa registracii elektroencefalogrammy dlya vyyavleniya razlichnykh izmenenij elektricheskoy aktivnosti golovnogogo mozga s cel'yu ih dal'nejshej interpretacii [The use of a sixteen-channel electroencephalogram registration complex to identify various changes in the electrical activity of the brain for the purpose of their further interpretation]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2021, vol. 17, no. 5, pp. 70–78.
9. Vaskovskaya L. F., Gordievich A. V., Kamlach P. V. Mnogokanal'nyy elektrokardiograf s fil'traciej elektrokardiogramm metodami median, Savickogo-Goleya i Chebysheva [Multichannel electrocardiograph with electrocardiogram filtration by median, Savitsky-Goley and Chebyshev methods]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-Measuring and Control Systems*, 2021, vol. 19, no. 6, pp. 45–54.
11. Voitenko V. P., Fedorova O. A., Ershov R. D. Elektronnaya sistema registracii i obrabotki bioelektricheskikh signalov [Electronic system of registration and processing of

bioelectric signals]. *Tekhnicheskie nauki i tekhnologii = Technical Sciences and Technologies*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 109–115.

12. Smirnova L. M., Ponomarenko G. N., Suslyayev V. G. Metodologiya i informacionno-izmeritel'naya sistema dlya personifitsirovannogo sinteza protezov nizhnih konechnostej [Methodology and information-measuring system for personalized synthesis of lower limb prostheses]. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy = Information-Control Systems*, 2021, no. 6, pp. 64–74. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-64-74>

13. Arbieva M. V. Zadachi reinnervatsii i obrabotki EMG-sigнала v razrabotke bioelektricheskogo proteza [Tasks of reinnervation and EMG signal processing in the development of bioelectric prosthesis]. *Molodezhnyj nauchnyj vestnik = Youth Scientific Bulletin*, 2018, vol. 4, no. 29, pp. 71–77.

14. Yatsun S. M., Yatsun A. S., Rukavitsyn A. N., Politov E. N. New approaches to rehabilitation of the ankle joint using a mechanotherapeutic apparatus. *Biomedical Engineering*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 37–41.

15. Kust S. Yu., Markova M. V., Pisareva A. V. Razrabotka algoritma opredeleniya mestnosti v sisteme upravleniya protezom nizhnej konechnosti [Development of an algorithm for determining the terrain in the control system of a lower limb prosthesis]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomeditsinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2021, vol. 20, no. 2, pp. 99–105.

16. Korneeva I. P., Kramar K. A., Semenova E. A., Sergeev A. M., Yuldashev Z. M. Aparatno-programmnyj kompleks dlya udalennogo monitoringa i kontrolya sostoyaniya beremennykh zhenshchin [Hardware and software complex for remote monitoring and control of the condition of pregnant women]. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2021, no. 6, pp. 21–30. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-21-30>

17. Pimenov V. I., Pimenov I. V. Interpretation of a trained neural network based on genetic algorithms. *Information and Control Systems*, 2020, no. 6, pp. 12–20. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-12-20>

18. Sulavko A. E., Lozhnikov P. S., Choban A. G., Stadnikov D. G., Nigrey A. A., Inivatov D. P. Evaluation of the EEG identification potential using a statistical approach and convolutional neural networks. *Information and Control Systems*, 2020, no. 6, pp. 37–49. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-37-49>

19. Zaichenko K. V., Gurevich B. S. Spektral'naya obrabotka bioelektricheskikh signalov [Spectral processing of bioelectric signals]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2021, vol. 1, no. 325, pp. 12–14.

20. Yatsun S. M., Yatsun A. S., Rukavitsyn A. N. The creation of a biomechatronic orthopedic device for the treatment of flat feet. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 54, no. 5, pp. 361–365.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Светлана Михайловна, доктор медицинских наук, профессор, завкафедрой медико-биологических дисциплин, оздоровительной и адаптивной физической культуры, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mbd155@mail.ru, Researcher ID: 423663, ORCID: 0000-0002-2020-0814

Svetlana M. Yatsun, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Head of the Department of Biomedical Disciplines, Health and Adaptive Physical Culture, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mbd155@mail.ru, Researcher ID: 123546, ORCID: 0000-0002-0477-392

Рукавицын Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alruk75@mail.ru, Researcher ID: 423663, ORCID: 0000-0002-2020-0814

Alexander N. Rukavitsyn, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alruk75@mail.ru, Researcher ID: 423663, ORCID: 0000-0002-2020-0814

Политов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: politovyevgeny@rambler.ru, Researcher ID: 176177, ORCID: 0000-0002-0597-8505

Evgeny N. Politov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: politovyevgeny@rambler.ru, Researcher ID: 176177, ORCID: 0000-0002-0597-8505