

УДК 621.3.038:616.8

Рощупкин Станислав Иванович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Приборостроение и транспорт», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

e-mail: siroshchupkin@mail.sevsu.ru

Солнцева Дарья Сергеевна, ассистент кафедры «Приборостроение и транспорт», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

e-mail: dssolntseva@mail.sevsu.ru

Огрызков Сергей Витальевич, старший преподаватель кафедры «Приборостроение и транспорт», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

e-mail: ogrizkov@mail.sevsu.ru

ПОРТАТИВНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И НЕЙРОСТИММУЛЯЦИИ ЭССЕНЦИАЛЬНОГО ТРЕМОРА

Аннотация. Представлена двухкомпонентная портативная система для диагностики и терапии тремора верхних конечностей у пациентов с болезнью Паркинсона. Система состоит из измерительного кольца, осуществляющего непрерывный мониторинг кинематических характеристик тремора и физиологических параметров, и портативного нейростимулятора в форме браслета, реализующего чрескожную электрическую стимуляцию нервов на основе данных, полученных с кольца.

Ключевые слова: болезнь Паркинсона, тремор, измерительное кольцо, нейростимулятор, чрескожная электрическая стимуляция нервов

Roshchupkin Stanislav Ivanovich, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Instrument Engineering and Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: siroshchupkin@mail.sevsu.ru

Daria Sergeevna Solntseva, assistant at the Department of Instrument Engineering and Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: dssolntseva@mail.sevsu.ru

Ogryzkov Sergey Vitalievich, Senior Lecturer, Department of Information Technologies and Systems, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: ogrizkov@mail.sevsu.ru

PORTABLE SYSTEM FOR MONITORING AND NEUROSTIMULATION OF ESSENTIAL TREMOR

Abstract. A two-component portable system for the diagnosis and therapy of upper limb tremor in patients with Parkinson's disease is presented. The system consists of a measuring ring that continuously monitors the kinematic characteristics of tremor and physiological parameters, and a portable neurostimulator in the form of a bracelet that implements transcutaneous electrical nerve stimulation based on data received from the ring.

Keywords: Parkinson's disease, tremor, measuring ring, neurostimulator, transcutaneous electrical nerve stimulation.

1. Введение. Болезнь Паркинсона (БП) является вторым по распространённости нейродегенеративным заболеванием после болезни Альцгеймера. По данным литературы, распространённость БП составляет 1–2 на 1000 населения в общей популяции, достигая 1–2% среди лиц старше 60 лет [1]. В Российской Федерации, по различным оценкам, насчитывается от 250 до 300 тысяч пациентов с БП, причём реальное число может быть выше вследствие недостаточной диагностики.

Тремор является одним из кардинальных симптомов БП, наряду с брадикинезией, ригидностью и постуральной нестабильностью [2]. Тремор покоя (частотой 3–7 Гц) наиболее характерен для БП и существенно нарушает способность пациента к выполнению повседневных действий: письму, приёму пищи, использованию мобильных устройств, одеванию. По данным исследований, до 70% пациентов с БП считают тремор наиболее беспокоящим

симптомом [3].

Традиционные методы оценки тремора основаны на клинических шкалах, в частности на унифицированной шкале оценки болезни Паркинсона MDS-UPDRS [4]. Эти шкалы имеют дискретный характер, зависят от квалификации врача и не позволяют оценивать тремор в повседневной жизни пациента вне клиники [5]. Фармакотерапия тремора эффективна, но сопровождается двигательными флуктуациями и побочными эффектами при длительном приёме. Глубокая стимуляция мозга высокоэффективна, но инвазивна и доступна ограниченному кругу пациентов [6].

В последние годы активно развиваются неинвазивные носимые устройства для чрескожной электрической стимуляции нервов. Как отмечают Иванова и соавт., тремор имеет сложный патогенез, что требует индивидуального подхода к терапии [7]. Одним из перспективных направлений является использование акселерометрического анализа для диагностики и мониторинга тремора [8]. Существующие решения имеют ограничения, связанные с отсутствием непрерывного измерения самого тремора и невозможностью реализации замкнутого контура управления.

2. Основная часть. Предлагаемая система основана на принципе пространственного разделения сенсорного и актуаторного модулей. Использование носимого кольца для обнаружения тремора рук позволяет достичь максимальной информативности измерения, поскольку амплитуда тремора наиболее выражена в дистальных отделах конечности [9].

Преимуществами отдельной архитектуры, являются максимальная информативность измерения тремора (амплитуда тремора максимальна на пальце, а не на запястье), отсутствие артефактов стимуляции на измерительные датчики (физическое разделение), возможность реализации замкнутого контура «измерение → анализ → стимуляция», эргономичность (кольцо малозаметно и не мешает повседневной активности).

Общая структурная схема системы (рисунок 1) отражает взаимодействие между двумя основными компонентами — измерительным кольцом и нейростимулирующим браслетом, а также их внутреннее функциональное наполнение.

Кольцо-датчик включает в себя: модуль электропитания и зарядки, который отвечает за энергоснабжение всех элементов кольца и подзарядку встроенной аккумуляторной батареи посредством порта USB-C. Сенсорный модуль необходимый для регистрации исходных данных, и использует совмещенные датчики движения (акселерометр и гироскоп) и физиологические сенсоры для контроля сердечного ритма и уровня кислорода в крови (сатурации). Модуль обработки сигналов и управления, реализованный на основе микроконтроллера, производит сбор информации с сенсоров, ее фильтрацию, спектральный анализ и прямую идентификацию тремора. Для отображения актуальных параметров: частоты сердечных сокращений, выраженности тремора и состояния заряда батареи предусмотрен OLED-экран. Беспроводная коммуникация с браслетом по протоколу Bluetooth Low Energy для отправки уже обработанных данных обеспечена BLE-модулем.

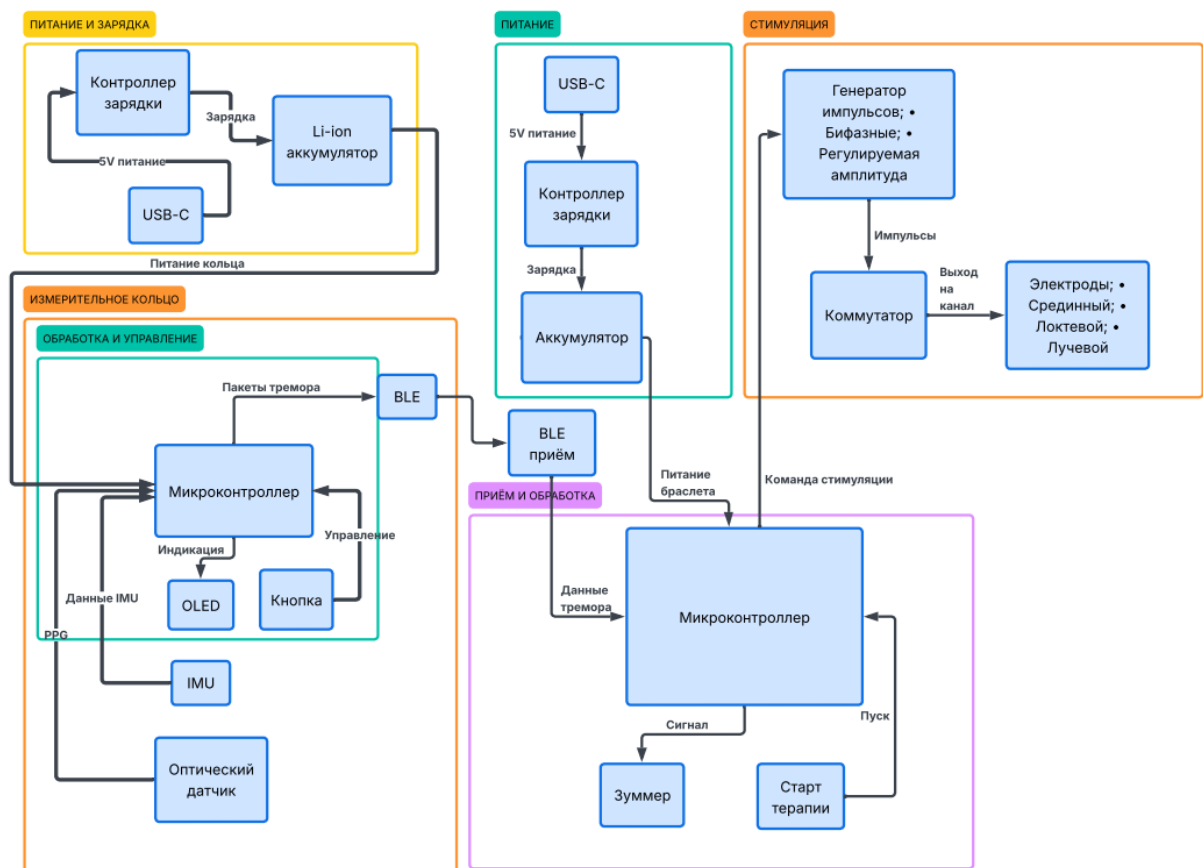


Рисунок 1– Общая структурная схема системы для мониторинга и нейростимуляции тремора

Браслет для нейростимуляции состоит из следующих ключевых блоков: блок питания, блок приема и анализа данных необходимый для получения информации, переданной с кольца по BLE, а также для интерпретации характеристик тремора, который на основе этой интерпретации генерирует управляющий сигнал о целесообразности, времени и режиме стимулирующего воздействия. Стимулирующий блок генерирует электрические импульсы с заранее заданными характеристиками (частота, амплитуда, длительность) и доставляет их через систему электродов к периферическим нервным волокнам. Звуковой оповещатель подает тональные сигналы для информирования пользователя о включении аппарата, его переходе в рабочее состояние и активации лечебного режима. Орган управления, представленный кнопкой, длительное удержание которой ответственно за активацию и деактивацию устройства, а краткое нажатие — за запуск или прекращение стимулирующей терапии.

Алгоритм работы (рисунок 2) системы реализует принцип обратной связи в реальном времени [10] и включает последовательные стадии:

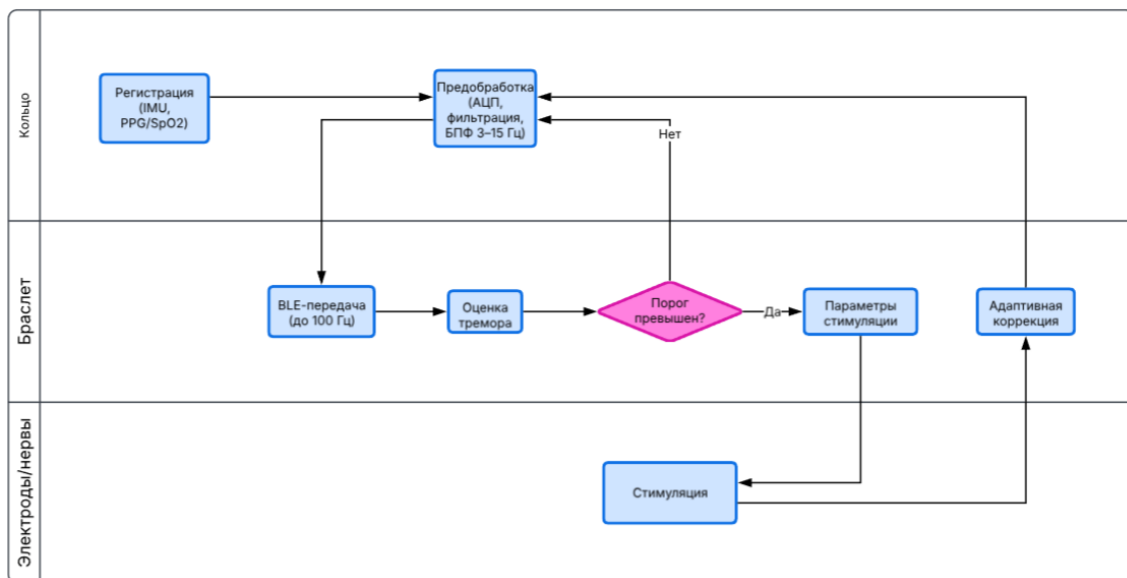


Рисунок 2. – Алгоритм работы системы для мониторинга и нейростимуляции тремора

Регистрация данных осуществляется датчиками, интегрированными в

кольцо, и осуществляют постоянный мониторинг кинематических показателей (линейного ускорения и угловой скорости движения пальца) и физиологических параметров (пульса и сатурации). Микроконтроллер кольца выполняет первичную обработку информации, которая включает в себя фильтрацию, спектральный анализ с выявлением преобладающей частоты в полосе 3–15 Гц и расчет амплитуды дрожания. Согласно исследованиям, акселерометрия является высокочувствительным методом оценки тремора [8].

Расчитанные характеристики тремора (частота, амплитуда, мощность) форматируются в цифровые пакеты и транслируются на браслет по беспроводному BLE-соединению с частотой обновления до 100 Гц. Микроконтроллер браслета анализирует входящий поток данных. При выявлении тремора, чья амплитуда или мощность превосходит установленный программный порог, формируется команда на инициацию стимуляции. Генератор импульсов стимулирующего модуля создает бифазные электрические импульсы с параметрами, скорректированными под текущие показатели тремора. Импульсы через коммутатор подаются на электроды, наложенные в области прохождения срединного, локтевого и лучевого нервов. Процесс измерения тремора кольцом продолжается и во время стимуляции, что дает системе возможность оценивать эффективность воздействия и оперативно корректировать его параметры.

На основе проведенных исследований, структурной схемы и алгоритма, изготовлен и протестирован действующий макет двухкомпонентной системы (рисунок 3). Макет включает в себя два основных блока: блок нейростимуляции (браслет) и блок измерения параметров тремора (кольцо).

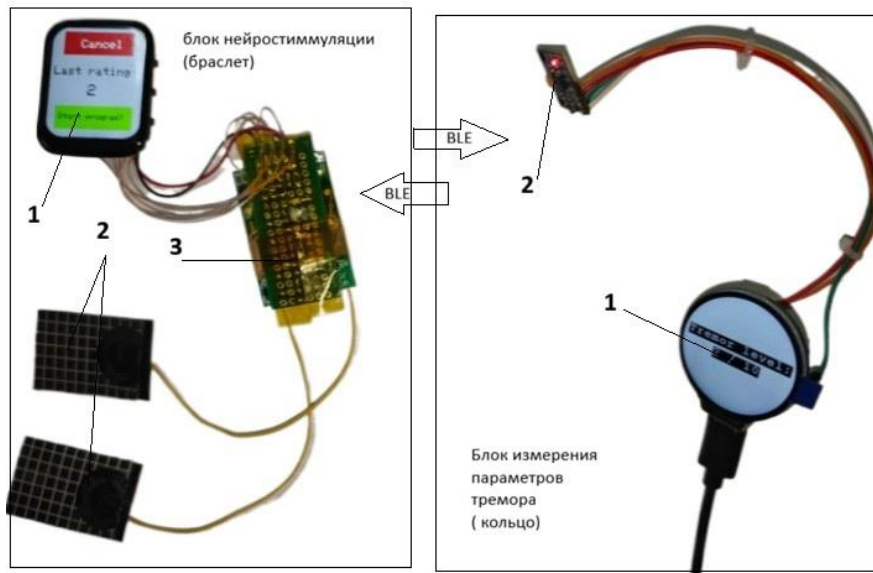


Рисунок 3 – Макет двухкомпонентной системы.

Блок нейростимуляции (браслет): 1. ESP32 S3 сенсорная плата ЖК дисплей; 2. Электроды; 3. Блок генерации импульсов;

Блок измерения параметров тремора: 1. Плата Waveshare RP2040-LCD-1.28 со встроенным акселерометром и гироскопом; 2. Датчик пульсоксиметрии MAX30102.

Блок нейростимуляции (браслет) состоит из следующих элементов:

1. ESP32-S3 сенсорная плата с ЖК-дисплеем — выполняет функции приёма данных с измерительного кольца по беспроводному каналу, анализа параметров тремора, принятия решения о необходимости стимуляции и отображения текущей информации на дисплее.

2. Электроды — расположены на внутренней поверхности браслета и обеспечивают передачу стимулирующих импульсов на биологический объект в проекциях срединного, локтевого и лучевого нервов.

3. Блок генерации импульсов — формирует бифазные электрические импульсы с регулируемыми параметрами (частота 50–200 Гц, амплитуда 0–20 мА, длительность 100–300 мкс).

Блок измерения параметров тремора (кольцо) состоит из следующих элементов:

1. Плата Waveshare RP2040-LCD-1.28 — оснащена микроконтроллером RP2040, цветным ЖК-дисплеем диагональю 1.28 дюйма и встроенным шестиосевым инерциальным измерительным модулем (акселерометр + гироскоп), который используется для регистрации кинематических характеристик тремора.

2. Датчик пульсоксиметрии MAX30102 — оптический датчик для измерения пульса и насыщения крови кислородом (SpO_2), что позволяет оценивать физиологическое состояние пациента в процессе мониторинга.

Заключение. В статье представлена двухкомпонентная носимая система для мониторинга и терапии тремора у пациентов с болезнью Паркинсона. Система состоит из измерительного кольца, осуществляющего непрерывный сбор и обработку данных о треморе и физиологических параметрах, и нейростимулирующего браслета, реализующего чрескожную электрическую стимуляцию нервов на основе данных, полученных с кольца.

Ключевыми особенностями системы являются:

1. Пространственное разделение сенсорного и актуаторного модулей, обеспечивающее максимальную информативность измерения и отсутствие артефактов;
2. замкнутый контур управления стимуляцией с обратной связью по реальному тремору;
3. несколько режимов работы (мониторинг, передача данных, терапия, сон);
4. встроенные механизмы безопасности (автоматическое прекращение стимуляции при потере связи или нарушении контакта).

Изготовлен и испытан действующий макет системы, подтвердивший работоспособность предложенных технических решений.

Библиографический список

1. Васильев Ю.Н. Болезнь Паркинсона и паркинсоновский синдром: учеб.-метод. пособие для студентов / Ю.Н. Васильев; ГБОУ ВПО ИГМУ Минздрава России. – Иркутск: Типография ИГМУ, 2013. – 30 с. – С. 4–11.

2. Гапонов А.О., Пригодина Е.В., Грудина Т.В., Доросевич А.Е. Современный взгляд на патогенетические механизмы прогрессирования болезни Паркинсона // РМЖ. 2018. № 12(1). С. 66–72.
3. Иванова, Е. О. Тремор: патогенез, особенности клинической картины и лечение / Е. О. Иванова, И. А. Иванова-Смоленская, С. Н. Иллариошкин // Неврологический журнал. – 2013. – № 5. – С. 4-9.
4. Единая унифицированная шкала оценки болезни Паркинсона Международного общества расстройств движений (MDS UPDRS) = The Unified Parkinson's Disease Rating Scale / ред. и пер. с англ. А.С. Касаткина, Л.Ю. Ковальчук, Н.А. Супонева, С.Н. Иллариошкин; Общероссийская общественная организация «Общество специалистов по нервно-мышечным болезням». – Москва: ООО «Типография «Миттель Пресс», 2017. – 99 с.
5. Бхаттачарья, К. Б. Болезнь Паркинсона и двигательные расстройства / К. Б. Бхаттачарья, Джимми А. Лалкака, Чарулата Савант Санхла, Петтарусп Мурзбан Вадиа. — 2-е изд. — Нью-Дели: Jauree Brothers Medical Publishers, 2022. — 350-380 с.
6. Дойчль, Г. Рандомизированное исследование глубокой стимуляции мозга при болезни Паркинсона / Г. Дойчль, К. Шаде-Бриттингер, П. Крак [и др.] // Медицинский журнал Новой Англии. – 2006. – Т. 355, № 9. – С. 896-908.
7. Евдокимов, К. М. Акселерометрический анализ в диагностике функционального тремора / К. М. Евдокимов, Е. О. Иванова, А. Г. Брутян, Е. Ю. Федотова, С. Н. Иллариошкин // Анналы клинической и экспериментальной неврологии. – 2024. – Т. 18, № 4. – С. 5-11.
8. Ян, Хайся. Умное носимое кольцо для обнаружения тремора рук у пациентов с болезнью Паркинсона / Хайся Ян, Исянь Шэнь, Вэй Чжуан, Чуньмин Гао, Донг Дай, Вэйгун Чжан // Компьютерное моделирование в инженерном деле и науках. – 2021. – Т. 126, № 3. – С. 1217-1237. – DOI: 10.32604/cmes.2021.014558.
9. Лакамера, Д. Архитектура встраиваемых систем / Д. Лакамера ; пер. с англ. В. С. Яценкова ; под науч. ред. А. Ю. Романова. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 132-136 с.
10. Миллер, Б. А. Раскрыт секрет Bluetooth / Б. А. Миллер, Ч. Бисдикян. – Нью-Джерси: Прентис Холл, 2000. – 85-110 с.