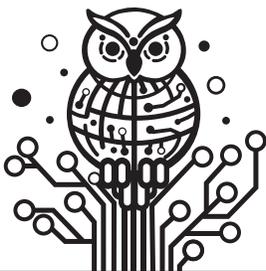

РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА



Ш К О Л А
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Университет «Сириус»
16–25 сентября 2024 г.

УДК 620.22

Макетное моделирование церебральных сосудов с гигантской аневризмой для верификации компьютерной модели оценки необходимости нейрохирургических вмешательств**Горина А. В.¹, Галястов А. А.^{1,2}, Ставцев Д. Д.^{1,2}, Коновалов А. Н.^{1,3}, Гребенев Ф. В.^{1,3}, Тельшев Д. В.^{1,2}***¹ Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)**119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2**gorina_a_v@staff.sechenov.ru**² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**³ Нейрохирургический центр им. Бурденко**125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16*

Определен алгоритм получения фантома сосуда головного мозга с аневризмой для проведения стендовых испытаний для верификации компьютерной модели. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования и стендовых испытаний.

Ключевые слова: церебральная аневризма; CFD-моделирование; гемодинамика; цифровая трассерная визуализация; лазерная спекл-контрастная визуализация; фантом сосуда.

Аневризма сосудов головного мозга представляет большую опасность для жизни и здоровья пациента в случае ее разрыва, так как приводит к внутримозговому кровоотечению [1, 2]. Для нейрохирургов важно обладать информацией о характере кровотока для принятия решения о ходе дальнейшего лечения пациента. Данные о потоке можно получить из результатов компьютерного моделирования, которые необходимо верифицировать с помощью стендовых испытаний на фантоме исследуемой модели, используя методы визуализации кровотока, такие как цифровая трассерная визуализация (ЦТВ) и лазерная спекл-контрастная визуализация (ЛСКВ).

Метод ЦТВ основан на регистрации движения флуоресцентных микрочастиц, добавленных в исследуемую жидкость, с помощью высокоскоростной камеры FASTCAM Mini AX 100 (Photron Limited, Токио, Япония) под воздействием излучения твердотельного лазерного модуля непрерывного действия с диодной накачкой с длиной волны 532 нм MGL-F-532 (Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., Чанчунь, КНР). С помощью ЛСКВ анализируется изменение спекл-картин, образованных в результате рассеяния света на движущихся частицах. Во время проведения стендовых испытаний камерой NIR camera acA2040-90umNIR (Basler AG, Germany) с лазерным диодом LD785-SH300 (Thorlabs Inc., США) с длиной волны 785 нм регистрируются изображения спеклов, образованные в результате движения жидкости.

Для проведения стендовых испытаний и беспрепятственной регистрации движения жидкости необходимо, чтобы фантом был изготовлен из прозрачных материалов. Фантом сосуда можно получить с помощью LCD-печати из прозрачной

фотополимерной смолы, а также путем отливки из прозрачного силикона. Из полидиметилсилоксана (ПДМС) заливаются две части мастер-модели с полостью в форме сосуда, которые после застывания склеиваются между собой, или одна часть склеивается с предметным стеклом. Кроме того, можно создать фантом методом послойного погружения пластиковой модели в ПДМС, далее модель выплавляется и остается силиконовая оболочка с фиксированной толщиной стенки [3, 4].

Были проведены стендовые испытания на четырех видах фантомов, результаты которых были сопоставлены с результатами компьютерного моделирования. С помощью ЦТВ возможно регистрировать движение частиц во всех случаях при условии равномерности внешней поверхности, чтобы не вызывать искажений на камере. Для ЛСКВ подходит вариант фантома с предметным стеклом, так как данный метод регистрирует движение в пристеночном слое.

Литература

1. Penn D. L., Komotar R. J., Connolly E. S. Hemodynamic mechanisms underlying cerebral aneurysm pathogenesis // *Journal of Clinical Neuroscience*, May 2011. 18, 1435–1438.
2. Lazzaro M. A., Ouyang B., Chen M. The role of circle of Willis anomalies in cerebral aneurysm rupture // *J. NeuroIntervent Surg.*, 2012. (4), 22–26.
3. Nilsson D. P. G., Holmgren M., Holmlund P., Wählin A., Eklund A., Dahlberg T., Wiklund K., Andersson M. Patient-specific brain arteries molded as a flexible phantom model using 3D printed water-soluble resin // *Sci. Rep.*, Jun, 2002. 12 (1), 10172.
4. Hayakawa T., Maruyama H., Watanabe T., Arai F. Three-Dimensional Blood Vessel Model with Temperature-Indicating Function for Evaluation of Thermal Damage during Surgery // *Sensors (Basel)*, Jan., 2018. 18 (2), 345.

УДК 621.3.049

Соотношение физиологических характеристик стадий сна между одновременно регистрируемыми ЭЭГ и МЭГ

Григорьева О. А., Клеева Д. Ф.*Национальный исследовательский университет**«Высшая школа экономики»**662972, г. Москва, Покровский бульвар, 11, стр. 10**olia.grigoreva2018@gmail.com*

Проведен комплексный анализ различных физиологических маркеров сна, выделенных в одновременно зарегистрированных ЭЭГ- и МЭГ-данных с их последующим сопоставлением в пределах нескольких стадий. Реализован синтез данных «смешанной» модальности при помощи реконструкции источников по МЭГ-записи с применением обратного оператора и изменением параметров нейросети UNET.

Ключевые слова: физиологические маркеры сна; реконструкция источников; классификация стадий сна.

Продолжительное время записи, полученные при помощи ЭЭГ, являлись некоторым золотым стандартом при выделении различных стадий сна. В связи с этим положением во многих работах, посвященных описанию классификаторов стадий сна, упоминается факт обучения моделей в большинстве случаев на данных, полученных при помощи ЭЭГ [1]. Таким образом, можно предположить получение на практике низких значений сходимости между последовательностями стадий, предсказанных при помощи классификаторов на основании МЭГ-данных, и последовательностями стадий, предсказанных на основании ЭЭГ-записей. Для преодоления данного ограничения в настоящем исследовании предполагается преобразовать имеющийся ЭЭГ-сигнал таким образом, чтобы увеличить сходимость между предсказаниями стадий для «преобразованной» записи и последовательностями классифицированных стадий для «первоначальной» ЭЭГ-записи, или, напротив, показать, что «новая» ЭЭГ-запись не содержит паттернов, позволяющих улучшить результат для имеющихся моделей.

В проведенном анализе данных можно выделить следующие этапы.

1. Разделение на стадии сна и расчет сходимости в пределах разных регионов

Данный этап выполнен при помощи функционала, предложенного в документации классификатора YASA. Данный алгоритм был выбран благодаря высокому показателю сходимости с ручной разметкой стадий сна клиницистами. Аналогичные алгоритмы находятся либо на стадии разработки и обучены на меньшем объеме нейрофизиологических данных, либо не обладают расширенным функционалом, отвечающим целям данного исследования (например выделение сонных веретен) [2]. Полученные на данном этапе последовательности были сопоставлены между собой. Под сходимостью в данном исследовании подразумевается коэффициент корреляции для качественных данных (меток стадий сна) в пересчете на проценты с заменой буквенных обозначений стадий на численные (например, стадии N1 соответствует число 1, стадии N2 — число 2 и т.д.). Большой процент соотносится с большей сходимостью (то есть с большей схожестью в предсказаниях между двумя последовательностями стадий).

2. Анализ сонных веретен

На данном этапе были выделены эпохи в записях на основании обнаруженных сонных веретен с последующим сравнением топографий на МЭГ- и ЭЭГ-сенсорах при помощи частотно-временного разложения.

3. Синтез ЭЭГ на основе МЭГ при помощи обратного оператора

В целях повышения показателя сходимости между предсказанными для МЭГ- и ЭЭГ-записей последовательностями была предпринята попытка видоизменения первоначального ЭЭГ-сигнала путем реконструкции источников по МЭГ-сигналу с использованием обратного оператора и последующего проецирования полученного сигнала на ЭЭГ-сенсоры. На данном этапе был произведен расчет прямой модели на основании данных о расположении источников, а также расчет обратного оператора (MNE) с его последующей нормировкой.

Литература

1. Dehghani N., Cash S. S., Halgren E. Topographical frequency dynamics within EEG and MEG sleep spindles // Clin. Neurophysiol., 2011a. Vol. 122. № 2. P. 229–235.
2. Vallat R., Walker M. P. An open-source, high-performance tool for automated sleep staging // eLife, 2021. Vol. 10. P. e70092.

УДК 616.853

Применение методов глубокого обучения для автоматического обнаружения междудорожных разрядов на основе фильтров параметрического сопоставления кривых

Белокопытов А. С., Клеева Д. Ф., Осадчий А. Е., д. к. н.*Центр биоэлектрических интерфейсов, НИУ «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
Asbelokopytov@edu.hse.ru*

Электроэнцефалография — важный инструмент для идентификации источников междудорожных разрядов и аномалий мозговой коры. Традиционный ручной анализ данных ЭЭГ медленный и подвержен ошибкам. В этом исследовании представлен алгоритм глубокого обучения, интегрированный с методом Fast Parametric Curve Matching (FPCM), для автоматического обнаружения спайков в данных ЭЭГ. Алгоритм достиг значительных результатов: ROC AUC 0,967, PR AUC 0,9224 и точность 0,935. Однако для достижения более высокой эффективности необходима дальнейшая оптимизация модели.

Ключевые слова: электроэнцефалография (ЭЭГ); эпилепсия; межприступные спайки; обнаружение спайков; глубокое обучение.

Введение

Электроэнцефалография (ЭЭГ) является золотым стандартом при диагностике эпилепсии. Видео-ЭЭГ-сессии, включая ночной мониторинг, помогают обнаружить эпилептическую активность, что требует дальнейшего МРТ-исследования для выявления структурных аномалий, таких как гиппокампальный склероз или опухоли. Автоматическая система обнаружения эпилептической активности через интериктальные спайки, внеприступные всплески электрической активности, значительно снижает нагрузку на клиницистов. В данной работе мы используем модель глубокого обучения, тренированную на коэффициентах, полученных с помощью алгоритма Fast Parametric Curve Matching (FPCM) [1], который использует параметрическую морфологическую модель для идентификации межприступных спайков. Эти признаки используются для обучения модели, адаптированной к ЭЭГ конкретного пациента. Вдохновленный моделью SincNet [2] FPCM уменьшает сложность и количество параметров, необходимых для обучения, улучшая извлечение признаков.

Материалы и методы

Анализировались данные ЭЭГ за период с 2022 по 2024 гг., включающие 24-часовые сессии, обработанные полосовым фильтром и прореженные. Записи были разделены на «норму» здоровых пациентов (класс 0) и межприступные спайки (класс 1), аннотированные неврологами. Для устранения дисбаланса классов использовалась аугментация. Сегментированные данные межприступных спайков и данные здоровых пациентов были выровнены и Z-стандартизированы. Модель включала коэффициенты FPCM как отдельный слой в Keras, анализируя и конкатенируя их с исходным сигналом ЭЭГ. Процесс обработки включал использование сверточных и полносвязных слоев.

Результаты

Все результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Эффективность модели при извлечении и ее обучении на различных параметрах FPCM (FP — ложноположительные результаты; FN — ложноотрицательные)

| Извлекаемые параметры | ROC AUC | PR AUC | Accuracy | FP/min | FN/min |
|---------------------------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|
| Без FPCM | 0,969±0,005 | 0,926±0,013 | 0,944±0,006 | 2,21±0,33 | 1,167±0,243 |
| c_1 FPCM-коэффициент | 0,935±0,013 | 0,853±0,02 | 0,901±0,036 | 4,14±2,85 | 1,86±0,72 |
| c_2 FPCM-коэффициент | 0,937±0,008 | 0,854±0,021 | 0,926±0,007 | 1,3±0,75 | 3,18±1,09 |
| c_3 FPCM-коэффициент | 0,921±0,018 | 0,821±0,055 | 0,913±0,023 | 2,54±1,43 | 3,02±0,6 |
| c_4 FPCM-коэффициент | 0,938±0,020 | 0,87±0,025 | 0,932±0,012 | 1,38±1,25 | 2,72±1,21 |
| c_5 FPCM-коэффициент | 0,903±0,115 | 0,785±0,282 | 0,842±0,164 | 7,09±10,46 | 2,43±2,47 |
| c_6 FPCM-коэффициент | 0,938±0,023 | 0,868±0,039 | 0,935±0,011 | 1,17±0,21 | 2,77±0,63 |
| Конкатенация всех коэффициентов | 0,967±0,015 | 0,9224±0,021 | 0,935±0,012 | 2,25±1,76 | 1,66±1,05 |

Обучение модели на каждом коэффициенте отдельно не привело к значительному улучшению производительности, что указывает на необходимость корректировки архитектуры.

Заключение

Исследование показало, что, хотя метод FPCM подходит для извлечения признаков из данных ЭЭГ, текущая архитектура модели может требовать дальнейшей доработки. В будущих работах внимание будет сосредоточено на оптимизации архитектуры и исследовании дополнительных методов для улучшения алгоритмов автоматического обнаружения спайков.

Литература

1. Kleeva D., Soghoian G., Komoltsev I., Sinkin M., Ossadchi A. Fast parametric curve matching (FPCM) for automatic spike detection // Journal of Neural Engineering, 2022. 19 (3). URL: <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac682a>.
2. Hung C.-H., Wang S.-S., Wang C.-T., Fang S.-H. Using SincNet for Learning Pathological Voice Disorders // Sensors, 2022. 22 (6634). URL: <https://doi.org/10.3390/s22176634>.

УДК 621.3.049

Печатные электродные 3D-матрицы для применения в биомедицине

Жирнов С. В., Тунеков Т. А., Киреев А. К., Каршиева С. Ш., Забегалов К. Н., Лагунов В. С., Сенатов Ф. С.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
szhirnov@misis.ru*

Разработаны гибкие и растяжимые печатные электродные 3D-матрицы на основе токопроводящего полимерного композиционного материала. Для синтезированного токопроводящего материала показано отсутствие цитотоксического влияния на клетки человека.

Ключевые слова: нейроинтерфейсы; 3D-печать; композиционные материалы.

Одними из наиболее используемых экспериментальных методов нейронаук являются электрофизиологические методы: электроэнцефалография, электрокортикография, электромиография, нейростимуляция. Все эти методы требуют использования отдельных электродов или электродных матриц как для отведения электрических сигналов с органов и тканей, так и для направленной их электростимуляции в целях возбуждения определенных групп клеток.

На сегодняшний день золотым стандартом в электрофизиологии являются многоэлектродные матрицы на гибкой подложке (полиимид, парилен-С, полидиметилсилоксан), считывающим и проводящим элементом в которых являются тонкие металлические пленки (золото, платина), а стандартным методом производства таких матриц является литография. Однако такие электроды имеют сразу несколько фундаментальных недостатков, вытекающих из природы их материалов: отсутствие растяжимости, что приводит к их смещению относительно считываемой ткани при движениях, а также деградация металлических электродов при постоянном изгибе, что приводит к критическому падению соотношения сигнал/шум (SNR) и в конечном счете выходу устройства из строя.

Альтернативным подходом является применение композиционных электропроводящих материалов на основе углеродных наполнителей и полимерной матрицы. В таких материалах электронная проводимость реализуется за счет формирования подвижной перколяционной сети из частиц наполнителя в полимерной матрице, вследствие чего материал куда менее подвержен растрескиванию, чем металлические пленки, и в некоторых случаях может пренебрежимо мало изменять свое сопротивление при деформации.

Демонстрируется возможность аддитивного производства гибких и растяжимых многослойных мультиэлектродных матриц, которые могут быть использованы в качестве токосъемного элемента в электрофизиологических устройствах. Изучены электромеханические свойства печатных 3D-образцов проводящих филаментов, для которых показано пренебрежимо малое изменение сопротивления при одноосном растяжении до 30% деформации (область естественной деформации кожи). Изучена структура напечатанных электродов, демонстрирующая развитую поверхность, что может говорить о высокой емкости электрода на границе раздела с физиологическими жидкостями. Разработан дизайн мультиэлектродной

матрицы, а также алгоритм 3D-печати с учетом особенности технологии формирования структуры методом осаждения из раствора (LDM).

Для разработанного токопроводящего материала показано отсутствие цитотоксического эффекта для клеток человека, что говорит о возможности его применения в инвазивных устройствах.

Литература

1. Sonkusale S., Shojaei M. B., Aeron S. Materials and Processing for Flexible Bioelectronics // Flexible Bioelectronics with Power Autonomous Sensing and Data Analytics. — Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 1–25.
2. Ferguson M. et al. A critical review of microelectrode arrays and strategies for improving neural interfaces // Advanced healthcare materials, 2019. Vol. 8. № 19. P. 1900558.
3. Shen K. et al. Translational opportunities and challenges of invasive electrodes for neural interfaces // Nature Biomedical Engineering, 2023. Vol. 7. № 4. P. 424–442.

УДК 621.317.39.084.2

Исследование материалов и технологий нанесения на кожу для улучшения чувствительности и точности углеродных электронных татуировок

Касаткина К. А.¹, Мурашко Д. Т.¹, Герасименко А. Ю.^{1,2}¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)**119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2**kseniakor1802@gmail.com*

В работе приведено исследование технологий формирования электронных татуировок для повышения чувствительности и точности диагностики физиологических показателей организма. Приведено сравнение углеродных нанотрубок, графена для формирования функциональных слоев электронных татуировок.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графен; электрофизические свойства; датчики; электронные татуировки.

В России наблюдается растущий интерес к инновационным медицинским диагностическим технологиям. Разработка сенсорных систем в виде функциональных электропроводящих слоев, наносимых на кожу (электронные татуировки), может существенно улучшить доступность и качество диагностики для пациентов в удаленных местах от медицинских центров [1, 2]. Актуальность исследования обусловлена увеличением числа хронических заболеваний и старением населения. Электронные татуировки могут стать важным инструментом для интеграции телемедицины в российскую систему здравоохранения, позволяя врачам удаленно отслеживать состояние пациентов и оперативно реагировать на изменения физиологических показателей [3, 4].

Основной целью работы является создание биосовместимых электронных татуировок с электрофизическими свойствами, сопоставимыми с электродами для медицинской диагностики.

Предложенная технология основана на формировании композитных слоев из комбинации углеродных нанотрубок, восстановленного оксида графена и биополимера альбумина для получения перколяционных сетей в биосовместимом матриксе. Для получения заданной топологии заранее подготовленные слои равномерно осаждались на целлюлозные подложки, далее обрабатывались электромагнитным излучением и переносились на поверхность кожи.

Экспериментальные исследования продемонстрировали, что электронные татуировки обладают высокой чувствительностью для изменения сигналов с поверхности кожи, обеспечивая точность измерений до 0,1 мкВ. Электропроводность слоев составила 20–35 мСм, импеданс и угол сдвига фаз регистрировались в частотном диапазоне от 20 Гц до 1 МГц, а предел измерения сдвига достигал 10 нм. Таким образом, электронные татуировки обладают высокой чувствительностью к изменениям сигналов на поверхности кожи, обеспечивая высокую точность измерений.

Результаты работы указывают на возможность внедрения данных инновационных решений для улучшения медицинской диагностики с высокой степенью надежности и чувствительности.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Кац Е. А. Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры: родословная форм и идей. — М.: изд-во ЛКИ, 2008.
2. Каримов Х. С. Исследование датчика давления на основе композита углеродных нанотрубок и комплекса ванадия // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2012. — Т. 55. — № 7. — С. 561–566.
3. Киреев Д. Изготовление, характеристики и применение графеновых электронных татуировок // Протоколы природы, 2021. — Т. 16. — № 5. — С. 2395–2417.
4. Киреев Д. Непрерывный безманжетный мониторинг артериального давления с помощью графеновых биоимпедансных татуировок // Природные нанотехнологии, 2022. — Т. 17. — № 8. — С. 864–870.

УДК 620.3

Гибкие сухие электроды на основе углеродных нанотрубок и графена для долговременного ЭКГ-мониторинга

Куксин А. В.¹, Герасименко А. Ю.^{1,2}¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**nix007@mail.ru*² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России**(Сеченовский Университет)**119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2**gerasimenko@bms.zone*

Разработаны гибкие сухие электроды на основе гибридных наноструктур из углеродных нанотрубок и графена, сформированных в матрице полидиметилсилоксана под воздействием лазерного излучения. Проведены экспериментальные исследования особенностей структурных и электрофизических свойств созданных электродов. Показана возможность применения электродов для измерения электрокардиограммы.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графен; лазер; электроды; электрокардиограмма.

Открытие новых аллотропных модификаций наноуглерода, таких как углеродные нанотрубки и графен, обозначило широкие перспективы для развития различных областей электроники. Поиск методов создания гибридных наноструктур на основе этих двух типов углеродных наноматериалов может привести к дополнению их структурных и электрофизических особенностей и созданию высокоэффективных устройств на их основе [1, 2].

Разработана методика формирования гибких сухих электродов на основе гибридных наноструктур из углеродных нанотрубок и графена, сформированных в матрице полидиметилсилоксана под воздействием лазерного излучения.

Проведенные экспериментальные исследования особенностей процесса формирования электродов выявили, что наиболее низким сопротивлением ~ 8 кОм обладали электроды на основе гибридных наноструктур из одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и восстановленного оксида графена (ВОГ). Формирование гибридных наноструктур в виде разветвленных электропроводящих сетей из ОУНТ и ВОГ производилось импульсным лазерным воздействием с длиной волны 1064 нм.

Исследования электрофизических свойств созданных электродов продемонстрировали возможность их применения для измерения электрокардиограммы (ЭКГ). Качество регистрируемого с помощью сформированных электродов сигнала ЭКГ соотносится с качеством сигнала, регистрируемого с помощью широко распространенных Ag/AgCl-электродов. Однако отсутствие гелевого слоя на сухих ОУНТ/ВОГ-электродах выгодно отличает их от коммерческих, так как при длительном ношении они не будут подвержены ухудшению качества сигнала из-за деградации гелевого слоя.

Для изучения биосовместимости электродов на основе ОУНТ/ВОГ проводились исследования процесса выращивания на их поверхности клеток фибробластов



эмбриона человека. После инкубации наблюдалось большое количество закрепленных и выросших клеток. Клетки образовывали структуры посредством межклеточных связей. Большая плотность роста клеток подтверждает, что клетки прикреплялись к поверхности электрода и вступали в активную фазу клеточного роста. Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени биосовместимости электродов на основе ОУНТ/ВОГ, что делает их пригодными для использования в контакте с кожей.

*Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта,
соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.*

Литература

1. Kumar R., Singh R. K., Dubey P. K., Singh D. P., Yadav R. M. // ACS applied materials & interfaces, 2015. Vol. 7. № 27. P. 15042–15051.
2. Kuksin A. V., Gerasimenko A. Yu., Shaman Y. P., Kitsyuk E. P., Shamanaev A. A., Sysa A. V., Eganova E. M., Slepchenkov M. M., Poliakov M. V., Pavlov A. A., Glukhova O. E. Improving the emission properties of graphene-carbon nanotube hybrid nanostructures through functionalization with BaO nanoparticles and laser treatment // Applied Surface Science, 2024. Vol. 664. P. 160222.

УДК 621.317.39.084.2

Формирование тонких пленок тензочувствительных сенсоров из электропроводящих углеродных наноструктур с лазерным воздействием для регистрации проявлений синдрома обструктивного апноэ сна

Морозова А. С.¹, Пьянов И. В.^{1,2}, Герасименко А. Ю.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
anastasiyamors@gmail.com*

² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2*

Созданы сверхрастягиваемые тонкопленочные тензочувствительные сенсоры из углеродных наноструктур методами спрей-осаждения и лазерного формирования. Описано влияние дисперсий на основе различных растворителей на электрофизические характеристики сенсоров. Предложена система для детектирования остановок дыхания.

Ключевые слова: нанокompозиты; углеродные нанотрубки; лазерное излучение; мониторинг дыхания; гибкая носимая электроника.

Гибкие тензочувствительные сенсоры, в отличие от металлических и полупроводниковых тензорезисторов, способны растягиваться до нескольких сотен процентов. Сенсоры на основе композитов углеродных нанотрубок (УНТ) с полимерными матрицами обладают повторяемостью при циклических нагрузках и долговечностью, высокой гибкостью и прочностью, а также являются сверхчувствительными к деформациям за счет высокого аспектного соотношения нанотрубок. Кроме того, УНТ обладают высокой электропроводностью благодаря туннельному эффекту и возможности создавать каркасную структуру. Поэтому тензочувствительные сенсоры на основе УНТ являются перспективными устройствами гибкой носимой электроники [1]. Одной из глобальных проблем здоровья человека на данный момент являются заболевания, вызывающие затрудненное дыхание. Синдром обструктивного апноэ сна (СОАС) представляет собой настоящую угрозу для сердечно-сосудистой системы человека [2]. СОАС тяжелой формы повышает риск смерти во сне от сердечного приступа у молодых людей на 30%. Поэтому существует необходимость создания систем амбулаторного длительного мониторинга дыхания с помощью тензочувствительных сенсоров.

Для создания тензочувствительных сенсоров разрабатывался автоматизированный метод спрей-осаждения дисперсий углеродных нанотрубок на полимерные матрицы. Матрицы из двухкомпонентного силикона изготавливались путем заливки в формы, напечатанные на 3D-принтере. Для приготовления дисперсий применялись карбоксилированные УНТ (КУНТ), диспергированные в дистиллированной воде, в изопропиловом спирте и смеси этилового спирта с помощью погружного ультразвукового зонда и ультразвуковой ванны. Лазерная обработка полученных углеродных пленок импульсным иттербиевым лазером 1064 нм



приводила к образованию перколяционных сетей УНТ и уменьшению сопротивления пленок почти в два раза.

Установлена зависимость сопротивления от количества осажденных слоев дисперсии, т. е. от толщины углеродной пленки: с увеличением количества слоев сопротивление уменьшается до значения ~ 22 кОм, после которого график выходит на плато. Полученная зависимость открывает возможность для точного контроля электрических характеристик сенсоров.

Проводилось исследование характеристик дисперсий КУНТ с различными растворителями. Наибольшей вязкостью обладала дисперсия с этиловым спиртом и дистиллированной водой — 1,27 мПа·с, а наименьшей обладала дисперсия с дистиллированной водой — 0,79 мПа·с. Таким образом, для метода спрей-осаждения наиболее подходящей является дисперсия КУНТ с этиловым спиртом и дистиллированной водой, так как образует проводящую пленку на поверхности силикона. Исследование спектров поглощения изготовленных дисперсий позволило установить, что вид растворителя не вносит значительных изменений на положение пиков поглощения в диапазоне от 300 до 1100 нм, однако наибольшим коэффициентом поглощения обладает дисперсия на основе смеси этилового спирта и дистиллированной воды.

Оценка электрофизических характеристик сенсоров на основе углеродных пленок показала, что сенсоры обладают близким к линейному поведением, которое обеспечивает стабильный отклик на деформацию сенсоров. Средний коэффициент чувствительности сенсоров составил $24 \pm 0,4$. Такие параметры сенсоров позволили создать систему мониторинга дыхания при подключении сенсоров к электронному модулю. В программе визуализации в режиме реального времени строились графики сигналов сенсоров от времени в процессе вдоха и выдоха, что позволило обнаружить моменты остановки дыхания.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России
(проект FSMR-2024-0003).*

Литература

1. Zhiran Shen, Fanmao Liu, Shuang Huang, Hao Wang, Cheng Yang, Tian Hang, Jun Tao, Wenhao Xia, Xi Xie. Progress of flexible strain sensors for physiological signal monitoring // Biosensors and Bioelectronics, 2022. Vol. 211. P. 114298.
2. Jun J. C., Swati Chopra and Schwartz A. R. Sleep apnoea // European Respiratory Review, 2016. Vol. 25. № 139. P. 12–18.

УДК 612.821

Нейроинтерфейс, дополненный механотерапией нижних конечностей и чрескожной электростимуляцией спинного мозга

Решетникова В. В.¹, к. б. н., Боброва Е. В.¹, д. б. н., Вершинина Е. А.¹, к. б. н., Гришин А. А.¹, к. ф.-м. н., Бобров П. Д.^{2,3}, к. б. н., Исаев М. Р.^{2,3}, Герасименко Ю. П.¹, д. б. н.

¹ Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН
199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 6
3069@bk.ru

² Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН
117485, г. Москва, ул. Бутлерова, 5А

³ РНИМУ им. Н. И. Пирогова Минздрава России
117513, г. Москва, ул. Островитянова, 1

Разработан и протестирован нейроинтерфейс, основанный на воображении движений нижних конечностей и дополненный механотерапией и чрескожной электростимуляцией спинного мозга. Исследование на здоровых испытуемых показало изменение ЭМГ-активности соответствующих мышц и изменение ЭЭГ-активности мозга.

Ключевые слова: нейроинтерфейс; воображение движений; механотерапия; чрескожная электростимуляция спинного мозга.

Нейроинтерфейсы — системы, позволяющие передавать команды, кодируемые активностью мозга, на внешние устройства, они могут быть использованы в области нейрореабилитации, в том числе двигательных функций [1].

На 11 здоровых волонтерах (семь женщин и четверо мужчин, 18–45 лет) разработан и протестирован нейроинтерфейс, основанный на кинестетическом воображении движений нижних конечностей (тыльное сгибание стоп) и дополненный чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга (ЧЭССМ) и механотерапией. Каждый участник эксперимента принял участие в четырех сессиях управления нейроинтерфейсом: (1) только со зрительной обратной связью, (2) с добавлением механотерапии, (3) с добавлением ЧЭССМ, (4) с добавлением механотерапии и ЧЭССМ. Перед испытуемыми была поставлена задача кинестетически вообразить тыльное сгибание правой или левой стопы либо находиться в состоянии покоя согласно инструкции, предъявляемой на экране монитора. Механотерапия, представляющая собой пассивное сгибание стоп с помощью механотренажера «Био-Кин» (ООО «Косима»), запускалась в случае успешного воображения движения испытуемым. При помощи ЧЭССМ стимулировали дорсальные корешки спинного мозга на уровне позвонков L1–L2 на расстоянии 1,5 см от средней линии позвоночника: при инструкции воображать движения левой стопы — с левой стороны тела, при воображении движений правой стопы — с правой стороны тела. ЧЭССМ представляла собой ритмическую стимуляцию через накожные электроды импульсами длительностью 1 мс с частотой 15 Гц, заполненными высокочастотным компонентом 5 кГц.



Дисперсионный анализ показал, что при воображении как правой, так и левой стопы добавление к работе нейроинтерфейса ЧЭССМ совместно с механотерапией увеличивает точность классификации сигналов мозга, то есть приводит к большому отличию активности кортикальных сетей при воображении движений от таковой в покое. Также при добавлении как механотерапии, так и ЧЭССМ наблюдаются значимые различия между активностью мозга в разных (альфа, бета-1, бета-2) диапазонах. Стимуляционные воздействия (ЧЭССМ и механотерапия) уменьшают ЭМГ-активность антагонистов (икроножной мышцы) при воображении движения обеих стоп и активность левой передней большеберцовой мышцы (агониста) при воображении движений ведущей ноги. Эти эффекты, по-видимому, важны для формирования адекватных координационных паттернов мышечной активности, обеспечивающих лучшее следование инструкции воображать движение.

Полученные данные могут быть использованы в области нейрореабилитации движений нижних конечностей, в том числе при синдроме отвисающей стопы.

Литература

1. Young M. J., Lin D. J., Hochberg L. R. Brain-computer interfaces in neurorecovery and neurorehabilitation // *Seminars in Neurology*, 2021. Vol. 41. № 2. P. 206–216.

УДК 621.389

Реструктуризация поверхности стимулирующего электрода лазерным излучением

Круковский Н. С.¹, Герасименко А. Ю.^{1,2}¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России**(Сеченовский Университет)**119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2**krukovskijn@inbox.ru*

Реструктуризация поверхности стимулирующих электродов фемтосекундным лазерным излучением. Влияние данного метода на электрохимические характеристики электродов.

Ключевые слова: иерархическая реструктуризация; фемтосекундный лазер; стимуляция спинного мозга; электроды; фантомные боли.

Стимуляция спинного мозга может быть использована для лечения фантомных болей, поскольку обеспечивает воздействие на участки нервной системы, отвечающие за восприятие боли и ощущения в ампутированных конечностях. На данный момент существует несколько важных проблем, стоящих на пути создания эффективных и безопасных электродов для клинического применения. Одной из них является обеспечение безопасности и эффективности стимуляции при минимизации риска осложнений для доставки импульса к нервной ткани. Важной задачей служит разработка миниатюрных электродов с заданными значениями накопленного заряда и сопротивления, поскольку вместе с уменьшением размеров возрастает импеданс электрода. Необходимо нахождение правильного баланса между вышеперечисленными характеристиками наряду с биосовместимостью изделий [1, 2].

Одним из методов достижения вышеизложенных требований служит реструктуризация поверхности электрода с помощью лазерного воздействия, при которой изменяется морфология поверхности путем абляции, сублимации и плавления для придания управляемой шероховатости поверхности, что позволяет получить структуры с размерами элементов от 10^{-3} до 10^{-9} м. Использовался фемтосекундный твердотельный лазер с длиной волны 1030 нм для воздействия на электроды из сплава Pt-10Ir. Установлена связь между параметрами лазерного излучения, а именно мощности в диапазоне 0,6–3,35 Вт или плотности энергии 2–12,3 Дж/см² от получаемой иерархической структуры, и сопротивлением между электродом и биообъектом при частоте тока до 10^3 Гц. Выявлена зависимость между средней мощностью лазера и накопленным электродом зарядом. Модифицированный электрод фемтосекундным лазером обеспечивает при напряжении до 4,2 В увеличение мощности на 1 мАч/см². Достигнутая структура и электрофизические параметры электродов могут обеспечить эффективное применение их для нейростимулирующих устройств.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Shahram Amin, Wesley Seche, Nicholas May, Hongbin Choi, Pouya Tavousi, Sina Shahbazmohamadi. Femtosecond laser hierarchical surface restructuring for next generation neural interfacing electrodes and microelectrode arrays // Scientific Reports, 2022. Vol. 12. P. 1–19.
2. Nathan Dunlap, Dana B., Sulas-Kern, Peter Weddle, Usseglio-Viretta F., Laser ablation of Li-ion electrodes for fast charging: Material properties, rate capability, Li platin. and wetting // Journal of Power Sources, 2023. Vol. 537.

УДК 621.389

Микроэлектронные интерфейсы имплантируемых устройств для стимуляции нервной ткани

Кузнецова Е. А.¹, Герасименко А. Ю.^{1,2}¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**kuzya.evgen8@yandex.ru*² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России**(Сеченовский Университет)**119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2*

Приведено сравнение микроэлектронных интерфейсов для стимуляции нервной ткани из перспективных материалов по импедансу, частоте, нагреву, силе тока и гидрофильности. Предложены устройства на основе композиционных конструкций из полимеров и углеродных наноматериалов.

Ключевые слова: микроэлектронные интерфейсы; нейронные протезы; нейро-стимуляция.

Современная медицина неразрывно связана с микроэлектронными технологиями. В настоящее время для лечения пациентов с хронической болью и параличом используются электрические стимуляторы с нейроинтерфейсами, которые имплантируются на головной или спинной мозг, а также на периферические нервы. Экспериментальные исследования показывают, что низкоуровневая электростимуляция спинного мозга может значительно улучшить нейромоторную функцию и снизить интенсивность боли, что открывает новые возможности для немедикаментозной терапии в рамках нейрореабилитации.

Наряду с интерфейсами из благородных металлов, таких как платина, перспективными материалами для микроэлектронных интерфейсов имплантируемых устройств являются структуры из углеродных нанотроек (УНТ) и графена [1–2]. Несмотря на хорошие электрохимические показатели, главным отрицательным моментом платиновых матриц является низкое максимальное значение инъекции заряда, превышение которого приводит к расслаиванию при сильном воздействии током [3]. Электростимуляция такими устройствами приводит к увеличению шероховатости в 3–8 раз, импеданса — в 2–4 раза и снижению угла смачивания даже при низких нагрузках в пределах 1,0–1,6 мА [4]. Это происходит ввиду окисления металла, что является главной проблемой металлических интерфейсов для хронических применений.

Материалы на основе графена и УНТ обладают высокой электропроводностью до единиц кСм/м, гибкостью и высокой прочностью при нормальной и тангенциальной нагрузках с модулем Юнга до 1 ТПа, биосовместимостью и прозрачностью в широком спектральном диапазоне [5]. Главным преимуществом графена является высокая химическая стойкость при малой толщине (0,335 нм), а также возможность комбинирования его с различными материалами, улучшая характеристики изделий, что делает его универсальным материалом для электроники. В отличие от графена, УНТ имеют диаметр 0,4 до 40 нм с высоким аспектным соотношением длины и диаметра и могут обеспечивать создание настраиваемых перколяционных сетей при внешних воздействиях.

Анализ источников литературы позволил сформулировать совокупные параметры электродов на основе композиционных материалов из графена и УНТ для нейростимуляции:

- рабочая частота: < 1 кГц;
- нагрев: < 37 °С;
- сила тока: 60–100 мА;
- длительность импульсов: 0,5–1 мс;
- гидрофильность: краевой угол смачивания > 40 °.

Установлено, что углеродные наноструктуры с sp²-гибридизованной структурой за счет высокой подвижности заряда обеспечивают высокую электропроводность, теплопроводность, гибкость и биосовместимость, являясь хорошими кандидатами для создания микроэлектронных имплантируемых нейроинтерфейсов.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Alahi M. E. E., Rizu M. I., Tina F. W., Huang Z., Nag A., Afsarimanesh N. Recent Advancements in Graphene-Based Implantable Electrodes for Neural Recording/Stimulation // *Sensors*, 2023. Vol. 23. P. 9911.
2. Yuanyuan Guo, Shan Jiang, Grena B. J. B., Kimbrough I. F., Thompson E. G., Yoel Fink, Harald Sontheimer, Tatsuo Yoshinobu, Xiaoting Jia. Polymer Composite with Carbon Nanofibers Aligned during Thermal Drawing as a Microelectrode for Chronic Neural Interfaces // *ACS Nano*, 2017. Vol. 11. P. 6574–6585.
3. Ke Wang, Fishman H. A., Hongjie Dai, Harris J. S. Neural Stimulation with a Carbon Nanotube Microelectrode Array // *Nano Letters*, 2006. Vol. 6. № 9. P. 2043–2048.
4. Cavalcanti L., Filho G., Medeiros R., Diniz H., Damasceno I., Morya E., Simplicio H. Characterization of Spinal Cord Stimulation Electrode for Chronic Implant in Animal Models // *Engineering Proceedings*, 2023. Vol. 35. I. 34.
5. Kostarelos K., Vincent M., Heber C. and Garrido J. A. Graphene in the Design and Engineering of Next-Generation Neural Interfaces // *Advanced Materials*, 2017. Vol. 29. I. 42.

УДК 681.2.08

Перспективы применения кольцевого лазерного гироскопа в биомедицинских исследованиях

Сметанин И. А., к. т. н., Синельников А. О.*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы**117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6**Ismetanin.ilya@yandex.ru*

В статье описывается применение кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ) на виброподвесе для записи кардиосигналов. Представлены возможности гироскопов в диагностике сердечных и дыхательных заболеваний, спортивной медицине и неврологии. КЛГ может дополнить ЭКГ, предоставляя дополнительную информацию о частотном составе кардиосигналов.

Ключевые слова: кольцевой лазерный гироскоп; виброподвес; кардиосигнал; медицинская техника.

На сегодняшний день электрокардиограмма (ЭКГ) остается основным методом для записи кардиосигналов, используемым благодаря своей точности и распространенности в медицинской диагностике. ЭКГ регистрируется с помощью электродов, которые размещаются на теле человека вблизи сердца, и позволяет оценивать электрическую активность сердца. Однако последние исследования показывают, что гироскопы различных типов также имеют потенциал для записи кардиосигналов.

Гироскопическая кардиограмма (ГКГ), получаемая с использованием гироскопов, отличается от ЭКГ своей способностью фиксировать не только электрическую активность, но и механические колебания, связанные с сердечным циклом. Это открывает новые возможности для диагностики и мониторинга различных сердечно-сосудистых заболеваний, таких как аритмии и дисфункции клапанов. ГКГ может быть особенно полезной в случаях, когда ЭКГ не дает полного представления о состоянии сердца, например при наличии электродов или электрических помех.

В спортивной медицине гироскопы используются для более точной оценки двигательной активности спортсменов. Они позволяют анализировать параметры движений, такие как угловые скорости и ускорения, что важно для оптимизации тренировочных программ и предотвращения травм. Кроме того, в сочетании с пульсоксиметрами и другими приборами гироскопы помогают оценить физиологические реакции на физическую нагрузку и составить индивидуальные рекомендации по тренировкам.

В области неврологии гироскопы также нашли применение для регистрации неврологических проявлений, таких как треморы и двигательные расстройства. Они могут использоваться для оценки частоты и амплитуды колебаний, что помогает в классификации и мониторинге этих состояний. Анализ походки с помощью гироскопов является важным методом для диагностики болезней, связанных с нарушениями двигательных функций, таких как болезнь Паркинсона.

Современные МЭМС-гироскопы (микроэлектромеханические системы) представляют собой компактные и маломощные устройства, которые могут быть легко интегрированы в медицинские устройства и носимые технологии. Однако их точность и чувствительность могут быть недостаточными для определенных



медицинских приложений, требующих высокой точности измерений. Для таких целей кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ) на виброподвесе представляются более подходящим решением. Они обеспечивают высокую чувствительность и точность, что особенно важно для медицинских исследований и диагностики.

Целью исследования является изучение способности лазерного гироскопа ЛГК-400 фиксировать кардиосигналы и их влияние на его работу. Для этого был создан экспериментальный стенд, настроенный с учетом требований эксперимента, включая подачу кардиосигнала на гироскоп. В результате исследования были проведены запись и анализ выходных сигналов гироскопа при отсутствии и при наличии кардиосигнала. Ожидаем, что данные дадут понимание способности гироскопа регистрировать и использовать кардиосигналы для улучшения стабильности его работы.

Литература

1. Солдатенков В.А. и др. Электросейсмокардиоблок для неинвазивной диагностики заболеваний человека // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 2019. — С. 233–236.
2. Данилова Н.Н. Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования. — СПб.: ИНКАРТ, 2000.
3. Гуцол Л.О. и др. Физиологические и патофизиологические аспекты внешнего дыхания. — Иркутск: ИГМУ, 2014. — С. 7–9.
4. Лихачев С.А., Вашилин В.В., Дик С.К. Трemor: феноменология и способы регистрации. — Минск, 2010.
5. Вагнер Й.Ф. Об измерении параметров движения спортсменов с помощью гироскопов и акселерометров. Технические аспекты // Гироскопия и навигация, 2017. — Т. 25. — № 3. — С. 3–31.
6. Успенский В.М. Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов // Вестник Московской государственной академии делового администрирования. Серия: Философские, социальные и естественные науки, 2011. — № 1. — С. 104–112.

УДК 621.3.049

Инвазивная стимуляция периферических нервов как инструмент обратной связи в нейропротезной системе верхней конечности**Сокоян Г. А.¹, Пилюгин Н. С.¹, к. м. н., Биктимиров А. Р.², Синцов М. Ю.³, Лебедев М. А.⁴,**¹ *Центр нейробиологии и реабилитации мозга им. Владимира Зельмана, Сколковский институт науки и технологий
121205, г. Москва, Большой Бульвар, 30, с. 1*² *Дальневосточный федеральный университет
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10*³ *Исследовательский центр «Моторика»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 42, стр. 1, пом. №306*⁴ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1*

Исследования демонстрируют, что различные методы нейростимуляции могут эффективно восстанавливать тактильные и проприоцептивные ощущения у пациентов с ампутацией, а также снижать фантомные боли. В экспериментах участвовали два пациента с ампутацией верхней конечности, которым имплантировали электроды для стимуляции периферических нервов и спинного мозга. В результате тренировок пациенты смогли различать размеры объектов, управляя протезной рукой, что подтверждает потенциал использования нейростимуляции для создания мультисенсорных протезов конечностей.

Ключевые слова: ампутация; стимуляция; протезирование; периферические нервы; импланты; нейроинтерфейсы; интерфейс мозг — компьютер.

Ампутация конечностей приводит к таким разрушительным последствиям, как потеря моторных и сенсорных функций и фантомные боли в конечностях (PLP) [1]. В качестве лечения используются различные методы нейростимуляции, обеспечивающие искусственную соматосенсорную обратную связь, такие как стимуляция периферических нервов (PNS), стимуляция спинного мозга (SCS) и поверхностная электрическая стимуляция нервов (TENS) [2]. Помимо обезболивающего эффекта стимуляция способна создавать ощущения в фантомной конечности [2]. Такие испытания помогли бы выбрать наилучший метод или комбинацию методов и потенциально могли бы привести к разработке мультисенсорных протезов конечностей.

Двум пациентам с ампутацией верхней конечности на четыре недели имплантировали стимулирующие электроды, размещенные в медиальном нерве и эпидурально над спинным мозгом. PNS и SCS исследовались для каждого участника как подходы для обеспечения тактильных и проприоцептивных ощущений и подавления фантомных болей. Участники P1 и P2 — мужчины с левой трансвермеральной ампутацией. Каждый пациент подписал информированное согласие перед участием в экспериментах. Исследование было одобрено этическим комитетом Школы биомедицины Дальневосточного федерального университета (ДВФУ).



В ходе сенсорного картирования были определены характеристики тока, вызывающие проприоцептивный и тактильный ответ в фантомной кисти, что позволило включить стимуляцию в замкнутый контур управления протезом.

В этой задаче обратная связь от PNS позволяла различать размеры объектов, в то время как протезная рука захватывала цилиндрические объекты. Когда пациент инициировал захват, закрытие апертуры протеза (измеряемое с помощью энкодеров пальцев протеза) приводило к увеличению амплитуды стимуляции. Цилиндры были трех размеров: маленький (диаметром 20 мм), средний (40 мм) и большой (60 мм). Каждое тестирование захвата объектов состояло из двух сессий. В рамках сессии протезная рука хватала объект, а пациент должен был определить, является ли объект маленьким, средним или большим.

Во время сеансов испытуемые надевали повязку на глаза и шумоизолирующие наушники. При захвате они испытывали ряд вызванных ощущений, что позволило проверить, могут ли испытуемые связать уровень амплитуды PNS с размером апертуры протеза. Во время перерыва участники могли видеть протезную руку и цилиндры, и им разрешалось свободно взаимодействовать с ними.

Для каждого теста распознавания размера объекта параметры стимуляции выбиралась на основе предыдущего сенсорного картирования. Использовалась пара электродов, имитирующих проприоцептивное ощущение в фантомной руке. Диапазон амплитуд стимуляции выбирался комфортным для субъекта и соответствовал значениям психометрической шкалы от 1–2 (едва различимое) до 7–8 (сильное, но комфортное восприятие). Показания энкодеров пальцев протеза обеспечивали измерение апертуры протезной руки, которая изменялась от 0% (полностью закрыта) до 100% (полностью открыта). Этот сигнал преобразовывался в амплитуду, которые в начале задания были ниже порога сенсорного восприятия.

Оба участника определяли размер объекта, захваченного протезной рукой, с точностью, превышающей уровень случайного угадывания в 33%. На первый день пациент P1 улучшил точность с 28 до 57%, на последний день точность пациента достигла 67%, а итоговый балл после тренировки составил 73,33%. До тренировки P2 не мог назвать объект, но после тренировки точность достигла 34%. В конце его точность увеличилась до 85%. В контрольной сессии без стимуляции оба участника не смогли различить размер объектов.

Мы заключаем, что способность выполнять сложные сенсомоторные задачи может быть обеспечена у пациентов с ампутацией с использованием индивидуально подобранной комбинации методов нейростимуляции. В дополнение к восстановлению ощущений нейростимуляция подавляет PLP.

Литература

1. De Nunzio A. M., Schweisfurth M. A., Ge N., Falla D., Hahne J., Gödecke K., Petzke F., Siebertz M., Dechent P., Weiss T., Flor H., Graimann B., Aszmann O. C., Farina D. Relieving phantom limb pain with multimodal sensory-motor training // *Journal of Neural Engineering*, 2018. 15(6), 066022.
2. Soghoian G., Biktimirov A., Matvienko Y., Chekh I., Sintsov M., Lebedev M. A. Peripheral nerve stimulation enables somatosensory feedback while suppressing phantom limb pain in transradial amputees // *Brain Stimulation*, 2023. 16 (3), 756–758.

УДК 615.847 + 612.471.1

Исследование миоисигналов и разработка системы поддержки движения верхней конечности человека при нарушении проводимости**Соколов М. Е.¹, Гончарова А. В.^{1,2}, Карнуп Г. А.^{1,3}**¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
agoncharova@niime.ru² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

³ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1

Реализован алгоритм адаптации миостимуляционного сигнала в режиме реального времени с тремя видами подстройки миостимуляционного сигнала. Разработан нейросетевой алгоритм с предсказанием точности двигательной активности мышц порядка 83,6%.

Ключевые слова: миостимуляция; электромиография; мышечные дисфункции.

В настоящее время одной из проблем медицины является восстановление двигательных функций руки человека при моторных дисфункциях мышц. В связи со сложным паттерном движения верхних конечностей [1] реализация адаптивных систем миостимуляции и систем поддержки при совершении свободного движения остается открытой. На базе современных достижений микроэлектроники в обработке и методах предсказания биосигналов человека [2], а также достижений зарубежных партнеров [3] предлагается новый метод адаптивной миостимуляции, основанный на сравнении референтных электромиограмм (ЭМГ) с патологической огибающей, как наиболее информативной частью ЭМГ-сигнала, и подборе сигналов стимуляции исходя из антропометрических данных пользователя для двух случаев поражения верхней конечности.

1. Алгоритм на основе зеркального отражения данных с одинаковых мышц при парезах.

По данным ЭМГ-сигнала со здоровой руки, который принимается за эталон, происходит амплитудно-частотная подстройка стимулирующих импульсов для больной руки, которыми дополняется сигнал считанной электромиограммы [4] и далее передается на электроды миостимуляции. В случае парализации — нарушения иннервации одновременно обеих конечностей одного пояса — применяется второй сценарий.

2. Алгоритм на основе базы данных эталонных ЭМГ-значений.

При заданных параметрах (рост, вес, возраст) пациента подбирается доверительный интервал ЭМГ и наиболее физиологичный стимулирующий сигнал как разность референного и реальных сигналов.

Для реализации алгоритма проведено исследование мышечной активности выборки из 120 здоровых человек без сопутствующих заболеваний нервно-мышечной



системы согласно разработанной методике снятия данных с пяти мышц верхней конечности и сформирована база данных амплитудных характеристик ЭМГ. Репрезентативность выборки обеспечивалась различным физиологическим состоянием объектов исследования.

Реализован алгоритм адаптивной миостимуляции для верхней конечности с нейросетевым алгоритмом на базе вариационного автоэнкодера с точностью предсказания двигательной активности 83,6% [5].

Кроме того, исследование афферентного мышечного ответа эталонных сигналов позволило сформировать максимально физиологические импульсы стимулирующих сигналов с частотой дискретизации сигнала до 0,05 в сек. Это в свою очередь позволило применить прямой метод миостимуляции непосредственно на целевую группу мышц, что меняет терапевтический эффект по сравнению с HAL-терапией [6] нарушения двигательной активности в сторону удешевления и упрощения использования.

Полученные данные могут быть применены для лечебных целей как неотъемлемая часть системного подхода восстановления нейропластичности при цереброваскулярных болезнях, травматическом поражении мотонейрона конечности и миелопатии, в качестве стимулирующей терапии при ДЦП, мышечной дистрофии, рассеянном и боковом амиотрофическом склерозе, врожденных миопатиях и нейропатиях различной этиологии.

Литература

1. Охунжанова М. З. Реабилитация больных, перенесших инсульт // Barqarorlik Va Yetakchi Tadqiqotlar Onlayn Ijmiy Jurnali, 2022. — Т. 2. — № 4. — С. 78–85.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1. — С. 2–5.
3. Горнев Е. С. и др. Анализ разработанных зарубежных изделий микросистемной техники // Микросистемная техника, 2002. — № 7. — С. 6–11.
4. Гончарова А. В., Герасименко А. Ю. Исследование электромиографических сигналов пациентов в постинсультном состоянии для разработки алгоритма // Микроэлектроника и информатика — 2023. — С. 104–111.
5. Карнуп Г. А. Исследование вариационного автоэнкодера для обработки сигналов мышц и управления экзоскелетом руки // Российский форум «Микроэлектроника-2022», 2022. — С. 718–720.
6. Cruciger O., Schildhauer T. A., Meindl R. C., Tegenthoff M., Schwenkreis P. Impact of locomotion training with a neurologic controlled hybrid assistive limb (HAL) exoskeleton on neuropathic pain and health related quality of life (HRQoL) in chronic SCI: a case study // Disability and Rehabilitation. Assistive Technology, 2014. P. 1–6. ISSN 1748-3115. DOI:10.3109/17483107.2014.981875.

УДК 611.8

Разработка системы для нейромодуляции спинного мозга методом временной интерференции**Шалаева И. Г.***Научно-технологический университет «Сириус»**354349, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус»,**Олимпийский проспект, 1**00irinsshalaeva00@gmail.com*

Разработана система глубокой стимуляции спинного мозга методом временной интерференции электрических полей при эпидуральном наложении электродов. Проведено моделирование распределения полей в фантоме спинного мозга, приведены характеристики предлагаемой системы, структурное и схемотехническое решение. Адекватность моделирования оценивалась в ходе стендового эксперимента на цилиндрическом фантоме. Проведено пилотное тестирование на лабораторном животном.

Ключевые слова: стимуляция спинного мозга; временная интерференция; нейромодуляция; компьютерное моделирование.

Временная интерференция — это метод нейростимуляции, который использует генерируемые поверхностными электродами высокочастотные электрические поля для стимуляции глубоких нейронных структур, не затрагивая поверхностные, нецелевые структуры. Данный метод может иметь клиническое применение в области реабилитации после травм спинного мозга. Он может помочь в восстановлении контроля моторных и висцеральных функций, что может значительно улучшить качество жизни пациентов.

Была разработана система нейромодуляции спинного мозга методом временной интерференции электрических полей с использованием имплантируемых эпидуральных электродов. В частности, была разработана программа для моделирования распределения полей в фантоме спинного мозга и изготовлен макет системы глубокой стимуляции спинного мозга. Созданная программа упрощает определение оптимальных параметров управляющих сигналов стимулятора по критериям достижения порога возбуждения в координате целевой области и минимизации паразитной активации прочих зон. Адекватность расчетов была позднее проверена на цилиндрическом фантоме в ходе стендового эксперимента.

Задача разработки аппаратной части системы заключалась в поиске схемотехнического решения и создании системы для тестирования работоспособности прототипа и проверки точности моделирования. Генерация управляющих сигналов и регистрация экспериментальных данных осуществлялась при помощи модуля ввода/вывода аналого-цифровых сигналов E-502 (L-Card) и разработанных и изготовленных преобразователей сигналов. Один из них представлял собой ключевое звено стимулятора — выходной каскад, преобразующий сигнал перед его подачей на эпидуральные электроды. Он был разработан с учетом ряда ограничений, таких как возможная интерференция сигнала вблизи стимулирующих электродов.

Для тестирования макета и проверки результатов моделирования была изготовлена система позиционирования стимулирующих и регистрирующих электродов на поверхности и в объеме цилиндрического фантома, заполненного

физиологическим раствором, с использованием трехмерного роботизированного манипулятора, позволившая оценить распределение потенциалов в объеме.

В ходе пилотного тестирования на лабораторной крысе была экспериментально подтверждена работоспособность макета и эффективность метода временной интерференции применительно к активации глубоких структур спинного мозга, связанных с моторной функцией. Также было проведено сравнение двух паттернов стимуляции: временной интерференции синусоидальных сигналов и широтно-импульсной модулируемой временной интерференции.

УДК 621.3.049

Манжета на базе органических полупроводников для оптоэлектронной стимуляции периферических нервов
Юсуповская Е.А.¹, Марков А.Г.¹, Коновалов А.Н.^{1,2}, Пьявченко Г.А.¹,
Тельшев Д.В.^{1,3}

¹ Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)

119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

markov_a_g@staff.sechenov.ru

² Нейрохирургический центр им. Бурденко

125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработана полупроводниковая манжета для беспроводной стимуляции поврежденных периферических нервов. Представлены результаты проведения *in vitro* и *in vivo* исследований.

Ключевые слова: биоэлектроника; органические полупроводники; имплантируемое устройство; нейростимуляция.

Повреждение периферических нервов — одна из самых распространенных проблем в хирургии. Только в России в год требуется провести от 4 до 7 тысяч хирургических вмешательств в связи с такой травмой [1]. Для обеспечения более быстрого заживления была разработана специальная манжета для оптоэлектронной стимуляции на базе органического полупроводника. Она обеспечивает возможность беспроводной стимуляции нервов, возбуждая потенциал на устройстве только посредством световых импульсов от внешнего источника. Такая манжета представляет собой гибкую полиимидную пленку с золотым электродом (9 нм) и полупроводниковым пикселем, обеспечивающим стимуляцию поврежденного нерва при импульсе света 625 нм [2]. Материалы полупроводника — фталоцианин без металла H2Pc (30 нм) и N,N'-диметилперилен3,4,9,10-тетракарбонный диимид PTCDI (30 нм) — подобраны из расчета оптимальной эффективности под воздействием импульсов света с длиной волны в окне прозрачности биологических тканей.

Для обеспечения эффективной стимуляции клетки необходимо провести до 50 мВ для возбуждения потенциала действия. Индуцируемое фото ЭДС манжеты зависит от интенсивности светового импульса и составляет около 250 мВ для однослойного полупроводника на поверхности устройства, соответственно, может обеспечить инициацию потенциала действия клеток даже на расстоянии от полупроводникового пикселя.

Эффективность такого устройства уже доказана в ходе проведения экспериментов *in vitro* на клеточных культурах mpf и neuro2A. При стимуляции плотность населения клетками увеличивалась до двух раз в сравнении с этой же клеточной культурой без проведения стимуляции. При проведении эксперимента *in vivo* на седалищном нерве крыс линии Wistar проводимость рассеченного нерва у крыс после ежедневной стимуляции в течение трех месяцев была значительно лучше, чем ушитых рассеченных нервов без проведения стимуляции.

Литература

1. Говенько Ф. С. Хирургия повреждений периферических нервов. — СПб.: Феникс, 2010. — С. 384.
2. Markov A., Gerasimenko A., Boromangnaeva A. K. et al. Multilayered organic semiconductors for high performance optoelectronic stimulation of cells // Nano Research, 2023. Vol. 16. № 4. P. 5809–5816. DOI: 10.1007/s12274-022-5130-8. EDN RWBVPC.

УДК 681.326.3

Аппаратно-программный комплекс управления прототипом стимулятора зрительного импланта**Беянин Р. И., Савюк В. О., Малето М. И.***МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78*

В целях обеспечения работ по созданию прототипа стимулятора импульсов тока, формирующих фосфены изображения, разработано устройство управления для прототипа макета стимулятора, обеспечивающего формирование в независимых каналах последовательностей разнополярных импульсов с заданными временными характеристиками и уровнями напряжений, подключенных к электродам для имплантации. Устройство реализовано в виде конечного автомата на основе ИС программируемой логики.

Ключевые слова: конечный автомат; генератор паттернов; интерфейс SPI.

Для тестирования и работы целого ряда цифровых и аналого-цифровых устройств, представляющих синхронные конечные автоматы, требуется реализация встроенных или внешних генераторов цифровых паттернов, реализующих тактовые диаграммы (стимулы цифровых воздействий) для переключения состояний [1]. При этом в зависимости от назначения устройств количество синхронно переключаемых каналов может достигать нескольких десятков. Наиболее простой вариант технической реализации такого генератора основывается на загрузке битов кодовой последовательности в быстродействующее статическое ОЗУ и синхронизируемый внешним тактовым сигналом процесс последовательного считывания данных. Если использовать древовидное построение памяти с вложенными фрагментами повторяющихся участков тактовой диаграммы и описанием числа повторений этих фрагментов в той же памяти, то система становится универсальной, не зависящей от объема памяти. На первом уровне программируются элементарные фрагменты тестовых последовательностей, а второй уровень содержит таблицу повторений фрагментов и адреса переходов между фрагментами первого уровня. Такая организация памяти обеспечивает большое количество состояний выходных сигналов и высокую частоту смены состояний выходных сигналов. Пример такой разработки подробно описан в работе [2].

Данная работа представляет развитие подобных методов, в ней учитывается, что электрические стимулы в ряде случаев могут принимать отрицательные значения. Когда количество каналов, обеспечивающих определенную последовательность выходных битов, ограничено, для реализации генератора паттернов, видимо, достаточно создать поведенческое описание конечного автомата на основе программируемой логики. Для применения в макете прототипа стимулятора, формирующего импульсы тока с заданными параметрами, передающиеся на электроды, непосредственно контактирующие с клетками, отвечающими за обработку визуальной информации для формирования фосфенов изображений [3], разработано устройство управления для прототипа макета стимулятора, обеспечивающего формирование в независимых каналах последовательностей разнополярных импульсов с заданными временными характеристиками и уровнями напряжений, подключенных к электродам зрительного импланта.



В данной аппаратной реализации данные, считанные по протоколу UART, разделяются на несколько пакетов. Данные, определяющие временные параметры стимуляции, передаются в модуль генератора импульсов, который запускает работу загружаемого декрементного счетчика тактовых импульсов, число которых соответствует длительности импульсов или длительности интервалов между ними. Аналоговые параметры стимуляции составляют исходную информацию для модуля логики, который формирует посылки интерфейса SPI для управления внешними цифроаналоговыми преобразователями, встроенными в макет стимулятора.

В результате на основе программируемой логики семейства Arty-7 разработано устройство управления прототипом макета стимулятора зрительного импланта, в котором реализованы следующие характеристики:

- 1) время установки сигнала с ЦАП 25 нс;
- 2) длительность импульсов и пауз до 0,1 мкс;
- 3) количество разнополярных импульсов в пачке 1–150 шт.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ
(государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005,
Рег. № 123052400076-8).*

Литература

1. Martinez A. L. H., Khursheed S., Reddy S. M. URL: https://www.researchgate.net/publication/335324891_LFSR_generation_for_high_test_coverage_and_low_hardware_overhead. DOI:10.1049/iet-cdt.2019.004.
2. Горбоконенко П. А., Зинис К. А., Певцов Е. Ф., Чернокожин В. В. Программируемый генератор тестовых последовательностей // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2012. — Вып. 2 (229). — С. 97–103.
3. Liu X., Chen P., Ding X., Liu A., Li P., Sun C., Guan H. A narrative review of cortical visual prosthesis systems: the latest progress and significance of nanotechnology for the future // Ann. Transl. Med., 2022. 10 (12): 716. DOI: 10.21037/atm-22-2858.

УДК 007.52 + 621.865.8 + 615.825

Разработка управляющих биоприближенных сигналов экзоскелета руки методами ИИ**Гончарова А. В.^{1,2}, Карнуп Г. А.¹**¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

agoncharova@niime.ru

Представлены результаты исследования по разработке нейросетевого адаптивного алгоритма управления экзоскелетом руки для свободного движения с предсказанием в режиме реального времени и калибровкой под амплитудные возможности мышц пользователя.

Ключевые слова: электромиография; реабилитация; поддержка движения руки; экзоскелеты; нейросетевой алгоритм.

В России в 2022 году порядка 500 тыс. человек перенесли инсульт. Их количество будет расти в среднем более чем на 5% в год, на что влияет увеличение численности населения, среднего возраста и одновременно рост количества хронических болезней и повышение среднего уровня стресса в целом [1]. На данный момент существует острая необходимость в автоматизированной реабилитации, отсутствие которой сужает поток пациентов до 5000 человек в год.

Актуальна задача разработки реабилитационной системы для восстановления двигательной активности верхних конечностей пациентов, которые перенесли инсульт, в частности, одним из наиболее эффективных методов — с применением экзоскелета верхней конечности [2–4]. Основная причина отсутствия решения для свободного движения рукой заключается в отсутствии управляющих алгоритмов, сравнимых по вариативности и мобильности с разнообразием двигательных паттернов руки и сигналов активации мышечной системы.

В работе предлагается один из подходов к решению проблемы — использование нейросетевых методов генерации траекторий движения экзоскелета управляющими биоприближенными сигналами. Рассмотрены различные способы извлечения полезных признаков из электромиографического (ЭМГ) сигнала в целях их дальнейшей подачи в нейросетевой алгоритм. Наиболее продуктивными показали себя полосовая фильтрация частот и метод частотной выборки [5].

Для того чтобы учесть взаимное влияние параметров ЭМГ-сигналов и координатной зависимости, использована архитектура self-attention. Данный механизм позволяет оценить как влияние мод в разный момент времени в пределах одной мышцы, так и влияние мод разных мышц друг на друга. Благодаря архитектуре self-attention, применяемой к токенизированным параметрам, на математическом уровне удается учесть сразу три фактора: взаимное влияние других мышц, временные интервалы между модами и последовательность частот.

Разработан сенсор регистрации ЭМГ-сигнала с нескольких мышц, и на языке Python с применением программного пакета PyTorch реализован нейросетевой алгоритм обработки и расчета предсказания в режиме реального времени с калибровкой данных под амплитудный потенциал мышц пользователя [6].

Литература

1. Охунжанова М. З. Реабилитация больных, перенесших инсульт // *Barqarorlik va Yetakchi Tadqiqotlar Onlayn Ilmiy Jurnali*, 2022. Vol. 2. № 4. P. 78–85.
2. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазия? // *Пути стабилизации экономики России*. — Москва, 1999. — С. 162–174.
3. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // *Нано-и микросистемная техника*, 2009. — № 1. — С. 2–5.
4. Бижанов Д. и др. Обзор и анализ экзоскелетов верхней конечности для реабилитации // *Вестник КазАТК*, 2023. — Т. 124. — № 1. — С. 315–323.
5. Kozyr P. S. et al. Analysis of the effectiveness of machine learning methods in the problem of gesture recognition based on the data of electromyographic signals // *Computer research and modeling*, 2021. Vol. 13. № 1. P. 175–194.
6. Гончарова А. В., Герасименко А. Ю. Исследование электромиографических сигналов пациентов в постинсультном состоянии для разработки алгоритма // *Микроэлектроника и информатика — 2023*, 2023. — С. 104–111.

УДК 616.079.5:681.5

Разработка электромиографического человеко-машинного интерфейса

Гуслинцев Е. Е.¹, Зубков И. С.², Герасименко А. Ю.¹¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*² *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф*

Разработан человеко-машинный интерфейс, представляющий собой автономное устройство с электромиографическими датчиками и адаптивным алгоритмом обработки сигнала. Устройство предназначено для людей с ограниченными способностями в целях управления электронными приборами и замера сигналов с бицепса и трицепса для определения угла разгибания локтя.

Ключевые слова: электромиография; обработка сигналов; автономные носимые устройства; датчики.

Разработка человеко-машинного интерфейса имеет особую актуальность для задач реабилитации людей, у которых ограничена или отсутствует возможность управления персональным компьютером с помощью клавиатуры и мыши. Существующие компьютерные манипуляторы для людей с ограниченными возможностями имеют ряд недостатков. Такие устройства имеют высокую стоимость из-за сложной конструкции, вызывают проблемы при установке драйверов и имеют низкую совместимость с популярными операционными системами, вынуждая использовать специализированный компьютер, а их механические элементы подвержены износу.

Работа посвящена разработке электромиографического человеко-машинного интерфейса, лишённого вышеперечисленных недостатков. Интерфейс работает за счёт снятия электромиографического сигнала с разработанными многократно сухими электродами для датчиков, которые считывают активность бицепса, трицепса и запястья, что исключает механическое взаимодействие [1, 2]. Сигналы обрабатываются и конвертируются в команды Human Interface Device, обеспечивая совместимость с настольными и мобильными операционными системами. Время отклика не превосходит 500 мс. На стороне микроконтроллера используются алгоритмы фильтрации и анализа сигнала, частота считывания которого составляет 1 кГц. За счёт выявления из сигнала дополнительных факторов, которые позволяют определить положение руки, было реализовано управление курсором мыши одной рукой с минимизацией количества датчиков до двух с шестью электродами.

Установлено, что частота электромиографического сигнала, считываемого с мышц-антагонистов бицепса и трицепса, зависит от угла разгибания локтя. Если рука разогнута в локте до упора, то частота снятого сигнала повышается. Таким образом, исследованное поведение сигнала на бицепсе и трицепсе можно применить для определения угла разгибания локтя, не используя дополнительных механических элементов. Разработанное устройство предназначено для людей с ограниченными способностями в целях управления электронными устройствами.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России
(проект FSMR-2024-0003).*

Литература

1. Nikitina N. A., Ryabkin D. I., Suchkova V. V., Kuksin A. V., Pyankov E. S., Ichkitidze L. P., Maksimkin A. V., Kitsyuk E. P., Gerasimenko E. A., Telyshev D. V., Bobrinetskiy I., Selishchev S. V. and Gerasimenko A. Yu. Laser-Formed Sensors with Electrically Conductive MWCNT Networks for Gesture Recognition Applications // Micromachines, 2023. Vol. 14 (6). P. 1106.
2. Gerasimenko A. Yu. et al. Interfaces Based on Laser-Structured Arrays of Carbon Nanotubes with Albumin for Electrical Stimulation of Heart Cell Growth // Polymers, 2022. Vol. 14 (9). P. 1866.

УДК 621.3.049

Предсказание слова при натуралистическом восприятии речи

Лехницкая П. А.*ООО «Нейроконика Ассистив»;**Казанский (Приволжский) федеральный университет**lekhnitskaya.polina@gmail.com*

Получена примерная модель электрофизиологической активности головного мозга при прослушивании речи. Результаты работы модели были сравнены с результатами алгоритма обработки естественного языка в схожей задаче.

Ключевые слова: mask modelling; mTRF; ЭЭГ; естественная обработка языка.

Человеческий мозг — сложная динамическая система, непрерывно обрабатывающая входную информацию. Моделирование подобной системы представляется трудной задачей, но при ее решении возможно как лучше изучить особенности работы головного мозга, так и на основе этой работы спроектировать новые способы оптимизации существующих алгоритмов, применяемых в совершенно различных областях.

Целью текущего исследования является изучение связи между функцией ответов ЭЭГ во время естественного восприятия речи, оценкой уверенности обученной языковой модели. Предполагается, что связь между сигналами ЭЭГ и естественного восприятия речи обученной языковой модели существует. Ожидаемым результатом является моделирование указанной связи.

Была предпринята попытка к изучению связи между функцией ответов ЭЭГ и пропущенными словами во время естественного восприятия речи; возможностью моделирования данной электрофизической активностью и сопоставления полученной модели с обученными языковыми моделями в схожей задаче. Статистически значимые различия были получены в электродах T3, T5 и P3. Алгоритмы классификации машинного обучения также показывают четкие различия в сигналах ЭЭГ во время понимания аудиотекста. Были получены смоделированные ответы мозга для гамма- и бета-ритмов; данная модель была сравнена с языковой моделью. Полученный результат можно рассматривать как возможное решение для разработки семантической сети для речевой реабилитации среди пациентов с некоторыми типами афазии. Одним из возможных будущих направлений исследования является изучение процессов коммуникации в этой парадигме и увеличение размера выборки.

Литература

1. Bastos A. M., Lundqvist M., Waite A. S., Kopell N., Miller E. K. Layer and rhythm specificity for predictive routing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020. 117 (49), 31459–31469.
2. Bialas Ole, Jin Dou, Edmund C. Lalor. mTRFpy: A Python package for temporal response function analysis // *Journal of Open Source Software*, 2023, 8.89: 5657.
3. Lindboom E. et al. Incorporating models of subcortical processing improves the ability to predict EEG responses to natural speech // *Hearing Research*, 2023. 433: 108767.



УДК 681.51

Система управления объемным расходом для устройств микрофлюидики

Михалин Д. А.¹, Еценстов В. В.^{1,2}, Рыжков В. В.¹, Алибеков Р. Ш.¹,
Рыжиков И. А.¹, Родионов И. А.^{1,2}

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

irodionov@bmsu.ru

² ВНИИА им. Н. Л. Духова

127030, г. Москва, ул. Сушевская, 22

Показан программно-аппаратный комплекс управления объемным расходом в канале микрофлюидного чипа. Описаны алгоритмы, позволяющие получить высокую стабильность потока. Представлен комплекс, функционирующий в разомкнутом и замкнутом по расходу режиме и развивающий точность стабилизации в 0,2 мкл/мин.

Ключевые слова: микрофлюидика; орган на чипе; управление потоками; системы автоматического управления; микрофлюидные системы управления.

Системы «орган на чипе» считаются перспективной технологией для решения задачи тестирования новых лекарств и изучения иммунных реакций на клетках. Для оперирования системами органов на чипе требуется решить задачу контроля потоков между клеточными культурами, управляя подачей и обновлением питательной среды, прецизионно дозируя расход [1]. Использование перистальтических насосов ограничено высокой нестабильностью потока вследствие дозирования жидкости роликами, а шприцевых систем — дискретным движением шагового двигателя [2]. В пневматических регуляторах вталкивающую силу разности давлений на краях микрофлюидного канала создает воздушная среда в резервуаре с жидкостью. Пневматическое управление позволяет достичь высоких точностей стабилизации объемного расхода, однако накладывает ограничения в виде необходимости внешнего источника сжатого воздуха.

Для создания портативных прецизионных микрофлюидных приборов необходимо управлять потоками жидкостей без внешнего компрессора. Подобное решение построено по принципу регулятора давления, в котором пневматический насосный элемент включен в прямую цепь управления, что позволяет избавиться от внешнего источника сжатого воздуха. Для обеспечения желаемого расхода жидкости происходит замыкание обратной связи по расходу и давлению с достаточной частотой оцифровки АЦП для синтеза алгоритмов управления на основе фильтрующей оценки производных. Разработанный комплекс позволяет стабилизировать потоки в диапазоне расходов от 0,4 до 35 мкл/мин с точностью хуже 0,2 мкл/мин по 3σ на типовом общем гидравлическом сопротивлении канала чипа порядка 10^{11} кг/м⁴ с.

Литература

1. Li M., Zhu M., Huang R. et al. Blood–brain barrier microfluidic chips and their applications // *Organs-on-a-Chip*, 2023. Vol. 5. P. 100027. DOI: 10.1016/j.ooc.2023.100027. EDN SDEJSD.
2. Heo Y.J. et al. Tuning-free controller to accurately regulate flow rates in a microfluidic network // *Scientific reports*, 2016. Vol. 6. № 1. P. 23273. URL: <https://doi.org/10.1038/srep23273>.

УДК 544.532.122

Композиционный материал для биомедицинской электроники**Оцупко Е. П.¹, Савельев М. С.^{1,2}, Герасименко А. Ю.^{1,2}**¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
ekaterinaoitsupko@mail.ru*² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)**119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2*

Разработана технология создания композитного биосовместимого проводящего материала на основе биополимеров с добавлением углеродных нанотрубок. Формирование осуществляется методом двухфотонной полимеризации под воздействием лазерного излучения на длине волны 1070 нм.

Ключевые слова: двухфотонная полимеризация; композиционный материал; биомедицинская электроника; углеродные нанотрубки; биополимер.

Развитие биомедицинской электроники осложнено малым числом электропроводящих материалов, обладающих биосовместимостью. В настоящее время для биоэлектроники в основном используют биоинертные металлы и кремний, однако их механические свойства сильно отличаются от свойств нативной ткани. Решением проблемы могут стать гидрогели из биосовместимых полимеров. Проводимость таких материалов обеспечивается добавлением электропроводящего синтетического полимера либо внедрением электропроводящего наполнителя. Электропроводящие гидрогели применяются в разработке биосенсоров [1], гибких микроботов [2] и клеточных каркасов для регенерации тканей [3].

В данной работе представлена технология создания композитного биосовместимого электропроводящего материала методом двухфотонной полимеризации. Микрофабрикация основана на иницировании многофотонных процессов при использовании высокоинтенсивного лазерного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне. Полимеризация представленного материала происходит под воздействием наносекундного лазерного излучения на длине волны 1064 нм.

В состав гидрогеля входят бычий сывороточный альбумин (БСА), желатин, одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) и органический краситель эозин Н. БСА был выбран как основообразующий компонент по причине отличной биосовместимости, легкой доступности, способности к ферментативному разложению. Желатин играет роль гелеобразующего агента. Значение динамической вязкости подготовленного гидрогеля составило 4,81 мПа·с. По результатам исследования нелинейно-оптических свойств методом z-сканирования было выявлено, что увеличение вязкости образца приводит к уменьшению коэффициента преломления и, как следствие, увеличению двухфотонного поглощения образца. Это в свою очередь позволило уменьшить необходимую мощность лазерного излучения для достижения нужной энергии полимеризации. Для уменьшения пороговой экспозиции лазерного излучения в образец также добавлен эозин Н, играющий роль фотоинициатора. В качестве фотоактивирующих компонентов рассмотрены несколько органических красителей: бенгальский розовый, рибофлавин, конго красный и эозин Н. Последний из них выбран на основании результатов исследования

оптических спектров и нелинейных оптических характеристик веществ. ОУНТ выступают в роли наполнителя гидрогелевой матрицы, образуя при воздействии лазерным излучением единую объемную пронизывающую сеть, обеспечивающую электропроводность материала.

В качестве источника излучения при полимеризации использовался лазерный комплекс на основе иттербиевого лазера «ОКБ Булат». Образец помещался на стеклянную подложку, формирование структуры происходило в форме квадрата со стороной 5 мм, скорость сканирования — 240 мм/с. Характеристики лазерного излучения составили: длина волны 1070 нм, энергия 142 мкДж, частота 30 кГц и длительность импульса 100 нс.

Электрические характеристики сформированного композиционного материала исследовались четырехзондовым методом ван дер Пау. Средняя удельная электропроводность составила 21,73 мкСм·см. Представленный материал может быть использован в тканевой инженерии в качестве клеточного каркаса с электро-стимуляцией.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России
(проект FSMR-2024-0003).*

Литература

1. Xia S. et al. A flexible, adhesive and self-healable hydrogel-based wearable strain sensor for human motion and physiological signal monitoring // Journal of Materials Chemistry B, 2019. Vol. 7. № 30. P. 4638–4648.
2. Wang H. et al. Multimode microdimer robot for crossing tissue morphological barrier // Iscience, 2023. Vol. 26. № 11.
3. Navaei A. et al. Gold nanorod-incorporated gelatin-based conductive hydrogels for engineering cardiac tissue constructs // Acta biomaterialia, 2016. Vol. 41. P. 133–146.

УДК 004.94

Моделирование и анализ конструкции микрофлюидного чипа

Варфоломеева А. А., Паршина С. Р., Пятко Л. А.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
lapyatko@edu.hse.ru

Работа посвящена построению и анализу модели напряженно-деформированного состояния мембраны микрофлюидного чипа. Мембрана, являясь наиболее подвижным элементом чипа, подвергается механическим деформациям и напряжениям, которые способствуют накоплению микродефектов и повышению риска просачивания воздуха в его каналы. С помощью компьютерной модели исследуется влияние возможных изменений конструкции мембраны на минимизацию напряжений.

Ключевые слова: микрофлюидный чип; конечно-элементное моделирование; мембрана; ПДМС; ABAQUS.

Микрофлюидный чип — это компактное устройство, широко используемое в научных и медицинских целях для изучения биологических объектов, основанное на микрофлюидных платформах и культивировании клеток *in vitro*. Устройство представляет собой систему микроскопических каналов и полостей, позволяющую реализовывать различные операции выделения, сортировки и анализа биологической пробы. Микроканалы формируются в пластине полидиметилсилоксана (PDMS), которая наклеивается на предметное стекло. Для обеспечения движения жидкости внутри каналов используется система пневмонасосов, мембраны которых также формируются в PDMS-пластине.

В процессе эксплуатации воздух из пневмосистемы просачивается через мембраны, что приводит к образованию пузырьков внутри микрофлюидной системы, которые затрудняют прокачку по ней жидкости [1, 2]. Одной из возможных причин этого эффекта может быть износ PDMS, приводящий к появлению микродефектов, приводящих к пропуску воздуха.

В работе представлена компьютерная модель мембраны микрофлюидного чипа, которая позволяет проанализировать напряженно-деформированное состояние мембраны. Была исследована зависимость максимального напряжения от параметров мембраны, также было выявлено наличие концентраторов напряжений и предложены конструкторские решения по их устранению.

Литература

1. Michael Johnson, Greg Liddiard, Mark Eddings, Bruce Gale. Bubble inclusion and removal using PDMS membrane-based gas permeation for applications in pumping, valving and mixing in microfluidic devices // Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009. № 19. P. 1–9.
2. Lamberti A., Marassoab S. L., Cocuzzaab M. PDMS membranes with tunable gas permeability for microfluidic applications // RSC Adv., 2014. № 4. P. 61415.



УДК 004.932.72:615.47:535.8

Алгоритм обработки цифровых фотографий при визуализации вен в ближнем ИК-диапазоне

Ремизов Н. В., Якименко Д. С.

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С. П. Королева

443086, г. Самара, Московское ш., 34

erenv97@yandex.ru

Проанализированы существующие методы обработки изображений, полученных при визуализации вен в ближнем инфракрасном диапазоне. Оценена эффективность существующих методов. Составлена база данных изображений. Разработан алгоритм обработки изображений, позволяющий увеличить контрастность кровеносных сосудов относительно кожи.

Ключевые слова: визуализатор вен; ближний ИК-диапазон; OpenCV; CLANE; билатеральная фильтрация; фильтр Собеля.

Современные методы медицинской лабораторной диагностики зачастую требуют проведения венопункции, что может вызывать затруднения, когда вены не видны невооруженным глазом. Это потенциально приводит к ошибкам в заборе крови и интерпретации результатов анализов. Интерес к мониторингу вен также растет в спорте, особенно в пауэрлифтинге, где высокое давление при тяжелых подъемах может способствовать развитию варикозного расширения вен. Мониторинг изменений вен становится все более важным для спортсменов и тренеров.

Спрос на неинвазивные устройства, визуализаторы вен, растет. Хотя современные методы оптической визуализации вен имеют перспективы, существует ряд недостатков этих методов: малая глубина визуализации, малая контрастность, отсутствие стандартизированных параметров устройств. Встает задача разработки стандартизированного метода визуализации вен, включающего в себя как аппаратную стандартизацию, так и стандартизацию в вопросах обработки изображений [1].

В ходе данной работы были рассмотрены существующие подходы к обработке изображений при визуализации вен [2–4]. В частности, оценена эффективность следующих методов: методы улучшения гистограмм, линейные частотные фильтры, медианные фильтры, алгоритмы и фильтры выделения границ, вейвлет-фильтрация.

При помощи системы организации конкурсов по машинному обучению Kaggle была получена база данных, состоящая из 100 изображений предплечий различных людей, зарегистрированных в ближнем ИК-диапазоне [5]. В данной базе представлены предплечья с различными изъянами: слабой различимостью вен, татуировками, повышенной волосистостью. 70 из 100 изображений имеют разметку-маску вен.

Составлен алгоритм, включающий в себя обработку изображения путем последовательного применения следующих шагов: контрастно-ограниченная адаптивная гистограммная эквализация (CLAHE), билатеральная фильтрация, гауссов фильтр высоких частот, фильтрация Собеля по осям XY, CLANE. Работоспособность алгоритма была проверена средствами библиотеки OpenCV. Параметры алгоритма были подобраны вручную таким образом, чтобы получить высокую

различимость вен на фоне кожи рук во всей базе данных. Результаты работы алгоритма для пяти изображений из базы данных приведены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Исходные изображения



Рис. 2. Результаты работы алгоритма

Разработанный алгоритм позволяет существенно повысить контрастность кровеносных сосудов относительно окружающих тканей для всех изображений в базе данных. Быстродействие алгоритма позволяет применять обработку изображений в реальном времени, что является необходимостью для данного класса приборов.

Литература

1. Remizov N.V. et al. 3D Printed Modular Vein Viewing System Based on Differential Light Absorption in the Near Infrared Range // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, 2023. Vol. 9. № 2. P. 8.
2. Ahmed K. I., Mohamed H. H., Islam M. R. A Real Time Vein Detection System // *The Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS)*, 2018. Vol. 10. № 1. P. 9.
3. Francis M. et al. A novel technique for forearm blood vein detection and enhancement // *Biomedical Research*, 2017. Vol. 28. № 7. P. 7.
4. Ozkan H. et al. A portable multispectral vein imaging system // *Journal of electrical engineering*, 2023. Vol. 74. № 1. P. 6.
5. Forearm Veins (NIR) (Kaggle Dataset) [Electronic resource] / KAGGLE.COM: Machine Learning and Data Science Community. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/chrisnmugent/forearm-veins-nir> (дата обращения: 07.06.2024).



УДК 621.3

Исследование и разработка датчика секвенирования на базе отечественной КМОП-технологии 180 нм

Рожнов Д. А., Калёнов А. Д.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

derodens@mail.ru

Спроектирован и разработан датчик секвенирования для определения точной последовательности нуклеотидов в нити ДНК на базе отечественной КМОП-технологии 180 нм. Приведены характеристики датчика и краткое описание принципов работы.

Ключевые слова: ISFET; КМОП; ДНК; секвенирование.

Секвенирование ДНК — ключевое современное исследование в области молекулярной биологии и генетики. Секвенирование ДНК позволяет детально определить порядок нуклеотидных оснований в геноме организма, что имеет фундаментальное значение для понимания генетической информации. Секвенирование превращает биологическую молекулу в текстовый файл, который можно рассматривать и изучать подобно обычному тексту. Современные методы секвенирования порождают огромное количество коротких фрагментов, которые затем можно сравнивать с уже существующим геномом, выявляя различия в последовательности «текста» ДНК. Сравнивая ДНК различных клеток, можно найти поврежденный ген. Это важный шаг на пути к выявлению генетических заболеваний. К числу тяжелых заболеваний относят муковисцидоз, клеточная анемия и др.

Существующие методы секвенирования ДНК основаны на окрашивании с помощью флуоресцентного материала. Окрашивание — это утомительный процесс, который затрудняет проведение секвенирования в больших масштабах. Для преодоления недостатков традиционных методов секвенирования ДНК используются ионоселективные полевые транзисторы (ISFET). ISFET обеспечивает возможность получения изображения, что делает секвенирование ДНК более точным. Выбран ISFET с плавающим затвором, суть которого заключается в выносе чувствительной части датчика на поверхность пассивации интегральной схемы. Каждый ISFET расположен в собственной лунке. Форма лунки над ISFET — усеченный конус. Цепочка ДНК фрагментируется на мелкие части, образуя микробусины, которые помещаются в лунки. В процессе полимеризации преобразуется изменение pH в соответствующее выходное напряжение.

Суть передачи сигнала основывается на принципе работы приборов с зарядовой связью (ПЗС). Принцип работы ПЗС основан на изменении заряда при подаче напряжения на электрод. В устройстве ПЗС есть кремниевая подложка, на которой образован слой диэлектрика и электрод, выведенный из него. Если на него подавать высокий уровень напряжения, то носители заряда будут проникать вглубь структуры, тем самым образовывая потенциальную яму, так как дырки будут отсутствовать на границе разделов. При внедрении второго электрода в непосредственной близости к первому и подачт на него более высокого потенциала электроны будут переходить из одной ямы в другую. Основываясь на вышеупомянутой

механике, можно создать структуру из электродов, по которым сигналы будут проходить большие расстояния. Управлять данной структурой возможно благодаря всего трем шинам.

Проделана работа по изучению состояния современных технологий в сфере секвенирования, технической документации на данную тематику. Спроектированы и разработаны ISFET-структура и другие блоки, из которых в последующем создан датчик секвенирования, а также разработана тестовая структура для определения характеристик ISFET при различных вариациях, состоящая из четырех ISFET-структур с различными составляющими. Датчик секвенирования состоит из 5017600 ISFET. Напряжение питания составляет 1,8 В. Напряжение чувствительности — 500 мВ. Ток потребления составляет 112 мА. Занимаемая площадь — 249,6 мм².

Литература

1. Кузнецов А. Е. Гетерогенные биосенсоры на основе полевых структур: дис. ... док. тех. наук: 2.2.2. — Москва, Нац. исслед. ун-т МИЭТ, 2023. — С. 241.
2. Зубов В. В. Секвенирование по Ротбергу (потенциал полупроводникового секвенирования) // Биомика, 2013. — № 1–2. — С. 48–61.
3. Неизвестный С. И., Никулин О. Ю. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы // Специальная техника, 1999. — № 4.

УДК 621.3.049

Разработка интероцептивного тренинга с использованием биологической обратной связи

Русинова А. В.¹, Аксиотис В. А.¹, к. б. н., Володина М. А.^{1,2}, д. ф.-м. н.,
Осадчий А. Е.^{1,2,3,4}

¹ Центр биоэлектрических интерфейсов, НИУ ВШЭ
101000, г. Москва, Кривоколенный пер., 3а
arusinova@hse.ru

² Федеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБА РФ
117513, г. Москва, ул. Островитянова, 1, стр. 10

³ Научно-исследовательский институт искусственного интеллекта AIRI
123112, г. Москва, Пресненская наб., 6, стр. 2

⁴ ООО «ЛИФТ Центр»

121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,
ул. Нобеля, 5

5-дневный интероцептивный тренинг, основанный на методе биологической обратной связи, повышает субъективный уровень альтруизма, внимательности и осознанности участников. Эти данные открывают новые возможности для применения биомедицинской электроники в психофизиологии.

Ключевые слова: интероцепция; тренинг; физиология; эмоциональные процессы.

В последние годы тренинги, основанные на принципе биологической обратной связи, становятся все более востребованы. С их помощью можно повысить навыки саморегуляции физиологического и психоэмоционального состояния. Одним из новых направлений стали интероцептивные тренинги, в процессе прохождения которых участники учатся замечать свое сердцебиение. Ранее было показано, что после прохождения такого тренинга у участников наблюдается повышение интероцептивной точности. Причем эффект наблюдался как после прохождения четырех сессий по 40 минут [1], так и после тренинга длительностью 20 минут. В исследовании прохождения тренинга помимо повышения уровня интероцепции вызывало снижение уровня тревожности. Известно, что нарушение осознанной интероцепции наблюдается при ряде психических расстройств и соматических заболеваний. Это дает основание предположить, что повышение способности воспринимать сигналы собственного тела может уменьшить проявление симптомов этих заболеваний.

Целью нашей работы было создать интероцептивный тренинг, который приводит к повышению интероцептивной точности, и оценить его влияние на психоэмоциональное состояние участников.

Интероцептивный тренинг включал пять сессий, которые проводили ежедневно. Каждая сессия состояла из семи тренировочных блоков, в течение которых перед участниками была поставлена задача нажимать кнопку после указанного на экране количества ударов сердца (2, 3 или 4 удара). Каждый блок состоял из двух фаз по 24 испытания: в течение первой фазы через 200 мсек после обнаружения R-зубца, что соответствует времени, когда человек ощущает сокращение сердца, на экране предьявлялось анимированное изображение сердца в течение 200 мсек,

во второй фазе обратная связь о сокращении сердца не предъявлялась. Аналогичный протокол тренинга использовали в исследовании [2]. Перед каждым испытанием на экране отображалась инструкция, через сколько ударов сердца необходимо нажать на кнопку. Ответ считался правильным, если участник нажимал кнопку в течение 450 мсек после детекции R-зубца. После каждого испытания участники получали обратную связь в виде зеленой галочки (правильный ответ) или красной буквы «X» (неправильный ответ). Между фазами участникам давали письменную инструкцию в течение 30 секунд фокусировать внимание на ощущениях в своем теле, сделать глубже и медленнее вдохи и выдохи. За этим следовала 15-секундная пауза. Каждая сессия тренинга длилась примерно 40 минут.

Во время проведения тренинга первый ЭКГ-электрод крепился на среднеключичной линии с правой стороны от грудины, второй — с левой стороны по подмышечной линии.

В дальнейшем мы планируем включить в исследование 40 человек с прохождением предварительного и посттестирования. Тестирование будет включать в себя психологическое исследование, анализ interoцептивной точности, измерение ЭЭГ, ЭКГ, ЭМГ, кожно-гальванической реакции и респирометрии.

Различия в баллах психологического тестирования между группами до и после вмешательства были проанализированы с использованием дисперсионного анализа для повторных измерений (repeated measures ANOVA).

Результаты пилотного исследования, в котором приняли участие 11 человек (5 человек в экспериментальной группе, 6 — в контрольной), показали повышение субъективного уровня альтруизма ($p = 0,022$, $F = 6,805$), внимательности и осознанности в повседневной жизни ($p = 0,016$, $F = 7,738$) у участников тренинга.

С 1960-х годов известно, что физическое восприятие влияет на эмоции, а эмоциональные процессы — на поведение, особенно на принятие решений (гипотеза Антонио Дамасио). Мы предполагаем, что разработанный тренинг поможет участникам лучше понимать и регулировать внутренние сигналы своего тела. Это, в свою очередь, может увеличить их способность использовать более эффективные поведенческие стратегии.

Исследование осуществлено в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Литература

1. Sugawara A., Terasawa Yu., Katsunuma R., Sekiguchi A. Effects of interoceptive training on decision making, anxiet. and somatic symptoms // *BioPsychoSocial Medicine*, 2020. Vol. 14. № 1. P. 1–8. DOI: 10.1186/s13030-020-00179-7. EDN MOHNPB.
2. Meyerholz L., Irzinger J., Witthöft M., Gerlac A. L. and Pohl A. Contingent biofeedback outperforms other methods to enhance the accuracy of cardiac interoception: A comparison of short interventions // *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, 2019. Vol. 63. P. 12–20.

УДК 004.925.84

Проектирование трехмерных моделей матки и шейки матки на основе данных изображений УЗИ

Шалобыта Е. Н., Корнеева И. П.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
enshalobyta@stud.etu.ru*

Разработана методика получения параметрических твердотельных моделей матки и шейки матки по данным ультразвуковых изображений. Исследован потенциал их применения для выявления факторов наступления неблагоприятных перинатальных исходов.

Ключевые слова: параметрическое моделирование; твердотельные модели; беременность; преждевременные роды; биомеханика тканей.

Понимание тканевой биомеханики репродуктивных процессов играет ключевую роль в изучении нормального протекания беременности и выявления возможных аномалий на всех ее сроках. Несмотря на важность вопроса и растущий интерес к нему ученых и медиков, на сегодняшний день по-прежнему наблюдается нехватка клинических и фундаментальных научных исследований в данной области, что существенно осложняет задачу предупреждения и профилактики наступления патологических состояний.

Одной из доступных альтернатив прямым исследованиям физиологии беременности, проведение которых значительно ограничено особенностями ее протекания, является компьютерное 3D-моделирование. Создание параметрических твердотельных моделей обосновано, с одной стороны, их удобством (одна исходная модель может быть легко адаптирована под индивидуальные параметры), с другой стороны, их простотой и наглядностью, а также возможностью преобразования в числовые модели, пригодные для биомеханического моделирования.

Разработанный метод получения параметрических моделей основан на анализе изображений, полученных при проведении ультразвукового исследования (УЗИ) беременных женщин. Данные УЗИ являются более предпочтительными исключительно из практических соображений — как относительно недорогого и широко распространенного исследования с низким уровнем риска. Для получения всех необходимых анатомических параметров, используемых при построении трехмерных моделей, используется несколько изображений УЗИ, выполненных в разных (аксиальной и сагиттальной) плоскостях и при разном положении тела пациента. В число измеряемых параметров входят: диаметр матки, взятый в разных направлениях, толщина стенок матки, а также длина шейки матки (диаметр цервикального канала) — основной на сегодняшний день показатель, использующийся для выявления пациентов с высоким уровнем вероятности наступления неблагоприятного перинатального исхода [1].

Полученные трехмерные модели в дальнейшем могут быть преобразованы в численные для оценки механических нагрузок, расчета напряжения и деформации тканей. Именно по этим данным возможно определить анатомические

и механические изменения, подходящие для прогнозирования исхода беременности и предупреждения развития патологий.

Метод параметрического моделирования дает возможность быстрого создания твердотельных моделей матки и шейки матки по индивидуальным значениям показателей для каждого отдельного случая. Вместе с тем он включает в себя ряд упрощений, делающих его реализацию более доступной в ограниченных условиях [2].

Хотя метод не является строгим отражением естественной анатомии матки и шейки матки во время беременности, тем не менее он может стать основой для проведения исследований по расчету механической нагрузки и напряжения в тканях матки и шейки матки во время беременности.

Создание трехмерных моделей репродуктивных органов (матки и шейки матки) в период гестации позволяет получить более полное представление об их эволюции на протяжении беременности, изучить структурные изменения в окружающих органы тканях и способствует улучшению понимания общей биомеханики процесса. Все это в совокупности поможет разработать рациональные методы лечения патологий беременности, а также откроет новые возможности для разработки биомедицинских устройств, облегчающих прогнозирование развития неблагоприятных перинатальных исходов.

Литература

1. Louwagie E. M. et al. Longitudinal ultrasonic dimensions and parametric solid models of the gravid uterus and cervix // PLoS ONE, 2021. 16(1): e0242118.
2. Yoshida K. Bioengineering and the cervix: The past, curren. and future for addressing preterm birth // Current Research in Physiology, 2023. Vol. 6.