

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ НОСИМЫХ БИОСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ С САМОПИТАНИЕМ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ

Ахмед Сохайб А. Ф.

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

Научный руководитель: Тумилович М.В. - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры ЭТТ

Аннотация: В статье рассматривается переход от традиционных носимых IoT-устройств с литиевыми аккумуляторами к полностью автономным биосенсорным платформам. Представлена передовая архитектура, объединяющая гибридный энергоусъем на базе ферментных биотопливных элементов (BFC) и трибоэлектрических наногенераторов (TENG). Описана интеграция систем управления питанием с алгоритмами MPPT, гибких наноструктурированных суперконденсаторов и сверхмалопотребляющих пассивных каналов связи (NFC, RF Backscatter). Рассмотрены аспекты применения углеродных наноматериалов и технологий Edge AI. Предложенный подход формирует методологическую основу для создания необслуживаемых медицинских патч-систем непрерывного телемедицинского мониторинга.

Ключевые слова: биосенсоры, носимая электроника, биотопливные элементы, наногенераторы, TENG, суперконденсаторы, пассивная телеметрия, телемедицина, Edge AI.

Введение. Современные носимые биосенсорные платформы, находящиеся в авангарде персонализированной медицины, по-прежнему в значительной степени зависят от традиционных литиевых аккумуляторов. Это обстоятельство формирует их ключевое конструктивное ограничение и методологическую дилемму: при увеличении емкости источника неизбежно растут масса и габариты устройства, ограничивая мобильность пользователя и повышая дискомфорт, тогда как при уменьшении размеров резко сокращается срок автономной работы [1, 2]. Для имплантируемых решений, таких как кардиостимуляторы или нейростимуляторы, проблема приобретает еще более жесткий и критический характер, поскольку разряд источника питания нередко означает прямую необходимость повторного хирургического вмешательства, сопряженного с рисками для пациента.

На этом фоне концепция самопитающихся (self-powered) систем выглядит не просто привлекательной идеей, а единственно методологически обоснованной парадигмой развития. Устройство должно извлекать энергию из тех же физиологических или биомеханических процессов, которые оно регистрирует, переходя от режима периодического обслуживания к непрерывной эксплуатации. Этот сдвиг парадигмы требует пересмотра не только аппаратной части, но и всей методологии сбора и обработки медицинских данных [3].

Основная часть. Механизмы сбора энергии: сравнение классического и передового подходов

В контексте носимой электроники наиболее перспективными считаются два класса автономных источников: биоэнергетические элементы и трибоэлектрические наногенераторы (TENG). Каждый из них имеет свои преимущества и ограничения, и их синергетическое объединение является ключом к созданию надежных систем.

Традиционный IoT-подход: многие существующие разработки в области носимого Интернета вещей (IoT) по-прежнему используют устаревшие архитектурные решения. Как показано на блок-схеме стандартного IoT-устройства (рисунок 1), энергетическая цепь часто выглядит так: Пьезоэлектрические преобразователи (источник) → Схема умножения напряжения → Модуль зарядки аккумулятора → Аккумулятор (накопитель). Эта цепочка характеризуется множественными преобразованиями и потерями энергии. Например, пьезоэлектрики выдают высокое напряжение, которое необходимо умножить и затем преобразовать в низкий зарядный ток, что снижает общий КПД. Использование традиционного аккумулятора в качестве единственного буфера ограничивает гибкость и срок службы. Кроме того, этот подход часто полагается на энергоемкие WiFi модули для прямой

связи с веб-страницами, что быстро истощает энергию, полученную от харвестеров. Это базовая конфигурация с серьезными ограничениями.

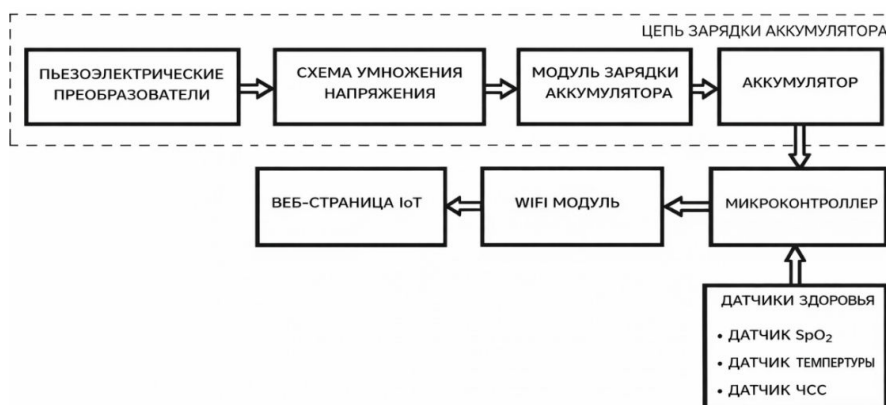


Рисунок 1 – Блок-схема традиционного носимого IoT-устройства

Передовой автономный подход: в отличие от классической модели, в статье обсуждается переход к более эффективной и гибкой архитектуре, представленной на блок-схеме автономного устройства (рисунок 2). Здесь биотопливные элементы (BFC) и TENG используются в качестве параллельных источников, оптимизируя сбор энергии. Наноструктурирование материалов, описанное ниже, является ключом к эффективности этих компонентов.



Рисунок 2 – Блок-схема усовершенствованной телемедицинской патч-системы с гибридным энергосбором

Для наглядного сопоставления ключевых технических и эксплуатационных параметров двух подходов в таблице 1 представлен сравнительный анализ рассматриваемых систем мониторинга.

Таблица 1 – Сравнительный анализ характеристик систем мониторинга

Параметр	Традиционный IoT (рисунок 1)	Автономная платформа (рисунок 2)
Источник питания	Литиевый аккумулятор	Гибрид BFC + TENG
Срок службы	Ограничен емкостью (1-2 дня)	Неограничен (Self-powered)
Вес и габариты	Высокие (из-за АКБ)	Сверхнизкие (гибкие пленки)
Протокол связи	Wi-Fi / Bluetooth (High Power)	NFC / Backscatter (Zero Power)
Экологичность	Проблемы утилизации лития	Биоразлагаемые наноматериалы
Обслуживание	Требует частой подзарядки	Не требует обслуживания

Ферментные биотопливные элементы (BFC) представляют собой элегантный вариант прямого преобразования химической энергии метаболитов организма в электрическую. Молекулы аналита, такого как глюкоза или лактат, выступают одновременно и в роли топлива, и в роли аналитического индикатора, что позволяет создавать «умные» биосенсоры с нулевым потреблением на сенсинг. Для эффективной работы BFC критически важно наноструктурирование электродов. Использование углеродных нанотрубок (CNT) и графена обеспечивает высокую удельную поверхность (рисунок 3), на которой иммобилизуется фермент.

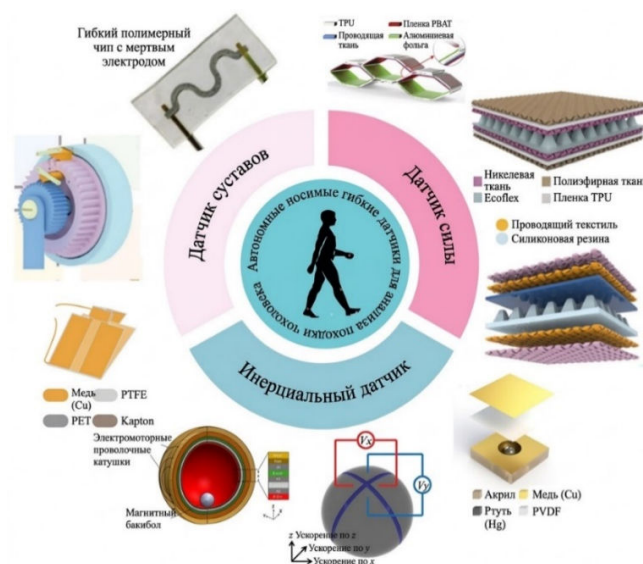


Рисунок 3 – Конструктивное исполнение и материальная база гибких носимых датчиков

Например, в лактат-кислородном элементе на аноде используется лактатоксидаза (см. рисунок 3), а на катоде – кислородвосстанавливающий катализатор (билирубиноксидаза) [3]. Чем больше площадь поверхности CNT/графенового анода, тем выше плотность тока, поскольку CNT/графен не только увеличивают площадь иммобилизации, но и облегчают прямой перенос электронов. Экспериментальные образцы носимых биоэлементов демонстрируют мощность от десятков до сотен микроватт [1, 3]. Продвинутые конструкции используют многослойные CNT/графен/CNT электроды для максимизации этого эффекта, достигая плотности мощности до 1 мВт/см^2 .

Трибоэлектрические наногенераторы (TENG) работают за счет использования механического движения тела. При периодическом контакте и разделении двух материалов с различной электроотрицательностью возникает эффект контактной электризации, формирующий импульсный высоковольтный сигнал [4]. Характерная электрофизическая особенность TENG заключается в сочетании высокого напряжения и малого тока. Из-за этого генератор целесообразно использовать не для прямого питания, а как компонент для медленного накопления заряда в высокоэффективном буфере (см. рисунок 2). Наноструктурирование поверхности также критично для TENG. Создание наноразмерных массивов на поверхности PTFE/Al пленок значительно увеличивает эффективную площадь контакта, а CNT/графеновые электроды обеспечивают низкое внутреннее сопротивление (см. рисунок 3).

Комбинирование этих принципов в гибридные схемы значительно повышает отказоустойчивость. BFC и TENG работают синергетически. BFC обеспечивает базовый, стабильный ток (например, от метаболитов в поту), а TENG компенсирует дефицит энергии при активном движении (см. рисунок 2). Этот гибридный подход позволяет покрывать фазы физической активности и периоды покоя: при снижении потоотделения дефицит компенсируется механическим каналом, а при минимальных движениях химический канал обеспечивает базовое питание микроконтроллера [1].

Архитектура управления питанием и энергетический баланс. Критически важным звеном в автономной системе является система управления питанием (Power Management System), представленная на блок-схеме (см. рисунок 2). Носимая электроника требует

сверхнизковольтных преобразователей, способных стартовать при входных напряжениях порядка сотен или даже десятков милливольт. На практике используются многоступенчатые схемы с цепями «холодного старта».

В отличие от традиционного подхода, продвинутая система включает в себя:

Систему MPPT (отслеживание точки максимальной мощности): поскольку выходные параметры BFC и TENG динамически меняются, алгоритмы MPPT подстраивают эквивалентную нагрузку преобразователя под текущие параметры генератора в режиме реального времени. Это гарантирует извлечение максимальной доступной мощности [5].

Гибкий суперконденсатор (энергобуфер): это ключевое отличие. Использование гибкого суперконденсатора вместо аккумулятора решает проблему медленной зарядки и ограниченного срока службы. Суперконденсатор способен аккумулировать заряд при неравномерном поступлении энергии и отдавать его мощными импульсами при пиковой нагрузке [6]. Использование высокоплотных CNT/графеновых электродов в суперконденсаторе (см. рисунок 3) обеспечивает высокую емкость.

Для энергетического баланса показано, что питание от суперконденсатора подается на микроконтроллер, который управляет датчиками и осуществляет обмен данными. Критически важно, чтобы совокупное энергопотребление системы не превышало мощность BFC и TENG.

Интеграция системы: вычислительные задачи и пассивная телеметрия. Современные микроконтроллерные системы на кристалле способны функционировать в микроваттном диапазоне. Сенсорный модуль с NFC-меткой может получать энергию от поля внешнего считывателя (на частоте 13,56 МГц) и работать без собственной батареи [7]. Альтернативным каналом является радиочастотный backscatter (обратное рассеяние). В этом режиме устройство не генерирует собственную радиопередачу, а изменяет импеданс антенны, модулируя отраженный внешний несущий сигнал [8]. Основная часть энергетических затрат перекладывается на внешний источник.

Материалы и технологии изготовления: от теории к практике. Для реализации самопитающихся систем критически важна материальная база, способная сочетать высокую электропроводность, гибкость и биосовместимость. Углеродные наноматериалы (нанотрубки, графен, MXene-пленки) и проводящие полимеры (PEDOT:PSS) играют центральную роль. Они служат основой для наноструктурированных электродов с высокой удельной поверхностью (см. рисунок 3).

В автономной носимой электронике востребованы углеродно-эластомерные композиты и MXene-пленки. Двумерные карбиды и нитриды переходных металлов (MXene) обеспечивают высокую электропроводность и возможность химической модификации поверхности [9]. Углеродно-эластомерные композиты успешно применяются в гибких электродах для BFC и контактных слоях TENG (см. рисунок 3).

С точки зрения производства преобладают методы печатной электроники (трафаретная печать), позволяющие наносить функциональные чернила на эластичные подложки из полиуретана (TPU) или силикона, формируя устройства, устойчивые к деформациям [9].

Edge AI и проблемы физиологической реализуемости. Несмотря на прогресс, практическая реализация сопряжена с фундаментальными проблемами, такими как нестабильность мощности и деградация ферментов [3, 5]. Для решения этих проблем интегрируются алгоритмы Edge AI (Граничного ИИ). Edge AI позволяет обрабатывать данные непосредственно на чипе, фильтруя шум и выявляя аномалии до передачи. Это не только снижает объем передаваемой информации, что критично для энергетического бюджета, но и позволяет компенсировать дрейф сенсоров за счет использования адаптивных моделей [10].

Заключение. Проведенный анализ подтверждает, что переход к полностью автономным биосенсорным системам является не просто техническим усовершенствованием, а фундаментальным парадигмальным сдвигом в развитии носимой медицинской электроники. В ходе исследования показано, что ключевым фактором успеха такой трансформации является конвергенция трех научно-технологических направлений: междисциплинарного материаловедения (использование MXenes, УНТ и графена), передовой схемотехники сверхнизкого энергопотребления (алгоритмы MPPT и цепи холодного старта) и инновационных протоколов беспроводной связи (пассивный Backscatter).

Синергетическое объединение биотопливных элементов (BFC) и трибоэлектрических наногенераторов (TENG) позволяет эффективно нивелировать стохастический характер биоэнергетических процессов, обеспечивая энергетическую устойчивость системы как в

состоянии покоя, так и при активных физических нагрузках. Интеграция гибких суперконденсаторов и технологий Edge AI завершает архитектуру устройства, превращая его из простого преобразователя сигналов в интеллектуальный диагностический узел, способный функционировать в условиях прерывистого энергоснабжения.

Несмотря на достигнутые результаты в области повышения КПД харвестеров, на пути к массовому клиническому внедрению остаются открытые вопросы, связанные с биосовместимостью интерфейсов и долгосрочной стабильностью ферментативных катализаторов в условиях сложной химической среды человеческого организма.

В связи с вышеизложенным, перед научным сообществом встает важный исследовательский вопрос: «Сможем ли мы в ближайшее десятилетие преодолеть термодинамический барьер деградации биоферментных катализаторов, чтобы обеспечить стабильную плотность мощности, достаточную для реализации полностью автономных нейроморфных вычислений (On-chip Neuromorphic Computing) непосредственно на кожном покрове пациента?»

Список литературы

1. *Self-Powered Biosensors for Monitoring Human Physiological Changes* / J. Wang [et al.] // *Biosensors and Bioelectronics*. 2023. Vol. 224. P. 142–158.
2. *Energy Solutions for Wearable Sensors: A Review* / A. Smith [et al.] // *Advanced Materials*. 2021. Vol. 33, No 19. P. 45–62.
3. *From Lab to Life: Self-Powered Sweat Sensors and Their Future in Personal Health Monitoring* / C. Lee [et al.] // *ACS Sensors*. 2025. Vol. 10, No 2. P. 215–230.
4. *Recent Progress in Energy Harvesting Systems for Wearable Technology* / X. Chen [et al.] // *Nano Energy*. 2023. Vol. 106. P. 312–330.
5. *Using Cold-Start Circuits in Energy Harvesting Systems for Medical Implants* / M. Rossi, K. Patel // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2024. Vol. 39, No 4. P. 4510–4522.
6. *Flexible CNT/Graphene Supercapacitors* / Y. Zhang [et al.] // *ACS Nano*. 2024. Vol. 18, No 6. P. 5420–5435.
7. *Passive Wireless Communication* / T. Nguyen, S. Williams // *IEEE Transactions on Communications*. 2023. Vol. 71, No 8. P. 4812–4825.
8. *Backscatter Communication for Body Area Networks* / R. Gupta [et al.] // *Computer Networks*. 2024. Vol. 240. P. 110–125.
9. *Materials for Printed Bioelectronics* / E. Davis [et al.] // *Materials Today*. 2025. Vol. 82. P. 88–105.
10. *Edge Intelligence for Healthcare* / H. Kim, L. Chen // *Nature Electronics*. 2024. Vol. 7, No 1. P. 22–35.

UDC 615.47:681.586

DESIGN OF AUTONOMOUS SELF-POWERED WEARABLE BIOSENSOR SYSTEMS FOR LONG-TERM HEALTH MONITORING

Ahmed Sohaib

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

Tumilovich M.V. – Dr. of Sci., Professor, Professor of the department of ETIT

Annotation. The article discusses the transition from traditional wearable IoT devices powered by lithium batteries to fully autonomous biosensor platforms. An advanced architecture is presented, combining hybrid energy harvesting based on enzymatic biofuel cells (BFC) and triboelectric nanogenerators (TENG). The study describes the integration of power management systems featuring MPPT algorithms, flexible nanostructured supercapacitors, and ultra-low-power passive communication channels (NFC, RF Backscatter). Aspects of carbon nanomaterial applications and Edge AI technologies are also considered. The proposed approach establishes a methodological framework for developing maintenance-free medical patch systems for continuous telemedicine monitoring.

Keywords: biosensors, wearable electronics, biofuel cells, nanogenerators, TENG, supercapacitors, passive telemetry, telemedicine, Edge AI.