

РЕАЛИЗАЦИЯ АУТОНОМНОГО ПИТАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ УСТРОЙСТВ МЕДИЦИНСКОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

В. В. Земцов¹, А. В. Иващенко²

¹ Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

² Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

¹ zemtsov.fond@gmail.com, ² anton.ivashenko@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель работы состоит в совершенствовании системы автономного электропитания устройств медицинского Интернета вещей за счет внедрения бетавольтаических источников питания. *Материалы и методы.* Метод исследования основан на реализации экспериментального образца бетавольтаического комплекса и проверки его характеристик на базе испытательного стенда. *Результаты.* Результаты работы состоят в реализации аппаратных и программных компонентов испытательного стенда (представляет собой отладочную плату), предназначенного для подборки режима работы бетавольтаических сборок, входящих в состав бетавольтаического комплекса, проведение его испытаний и формирование предложений по дальнейшему использованию предложенного подхода для проектирования и аппаратной реализации бетавольтаических комплексов в качестве конечных устройств, обеспечивающих импульсное питание устройств медицинского Интернета вещей. *Выводы.* Обоснованы преимущества реализации предложенного подхода, а именно: в использовании бетавольтаического комплекса в качестве системы электропитания медицинского Интернета вещей и дальнейшего применения полученных результатов в системе здравоохранения и медико-инженерном образовании.

Ключевые слова: медицинский Интернет вещей, системы электропитания, медицинская техника, бетавольтаический комплекс

Для цитирования: Земцов В. В., Иващенко А. В. Реализация автономного питания маломощных устройств медицинского интернета вещей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 126–136. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-15

IMPLEMENTATION OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY FOR LOW- POWER DEVICES OF THE INTERNET OF MEDICAL THINGS

V.V. Zemtsov¹, A.V. Ivaschenko²

¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

² Samara State Medical University, Samara, Russia

¹ zemtsov.fond@gmail.com, ² anton.ivashenko@gmail.com

Abstract. *Background.* The paper aims at improving the autonomous power supply system for medical Internet of Things devices by introducing betavoltaic power sources. *Materials and methods.* The research method is based on the implementation of an experimental sample of a betavoltaic complex and testing its characteristics on a test bench. *Results.* The results of the work consist in the implementation of hardware and software components of the test bench (which is a debug board) designed to select the operating mode of betavoltaic assemblies included in the betavoltaic complex, testing it and formulating proposals for further use of the proposed approach for designing and hardware implementation of betavoltaic complexes as end devices providing pulse power supply for Internet of Medical Things devices. *Conclusions.* The conclusions are to substantiate the advantages of implementing the proposed approach, namely, using a betavoltaic complex as a power supply system for the Internet of Medical Things and further application of the obtained results in the healthcare system and medical engineering education.

Keywords: medical Internet of Things, power supply systems, medical equipment, betavoltaic complex

For citation: Zemtsov V.V., Ivaschenko A.V. Implementation of autonomous power supply for low-power devices of the internet of medical things. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):126–136. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-15

Введение

Одно из важных направлений развития телемедицины, медицинской диагностики и реабилитации состоит в реализации технологий медицинского Интернета вещей [1–3]. Это направление представляет собой самостоятельную ветвь совершенствования Интернета вещей (IoT), объединяющую исследования в области медицины, информационных технологий, телекоммуникаций и связи. Перспективы развития медицинского Интернета вещей связывают с миниатюризацией используемых приборов, созданием платформы сбора и обработки информации и персонализации медицинских процедур лечения и реабилитации.

Развитие потенциала медицинского Интернета вещей [4, 5] также связывают с реализацией искусственного интеллекта для обеспечения новых возможностей по обработке больших объемов медицинских данных о здоровье отдельных пациентов. Современные технологии в этой области способны интегрировать различные умные устройства медицинской диагностики и реабилитации в единый комплекс системы цифрового здравоохранения [6, 7].

Для реализации медицинского Интернета вещей в здравоохранении необходимо также решить ряд задач инженерного характера [8–10], связанных с обеспечением производительности, интероперабельности, безопасности и энергообеспечения устройств Интернета вещей. В частности, проблема эффективного энергообеспечения устройств состоит в реализации автономных миниатюрных систем электропитания с длительным сроком эксплуатации. Для решения этой проблемы в настоящее время активно рассматривается применение бетавольтаических источников питания [11, 12].

Применение бетавольтаических источников питания в медицине предполагалось достаточно давно [13], например, в долгосрочных имплантируемых медицинских устройствах, таких как кардиостимуляторы [14] и дефибрилляторы. Также применяются устройства измерения внутриглазного давления у пациентов с глаукомой, имплантируемые в глаз пациента.

Современные работы [15, 16] существенно расширяют область их применения в здравоохранении, учитывая в том числе их соответствие требованиям радиационной безопасности. Перспективные области использования таких комплексов включают также разработку систем доставки лекарств *in vivo*, церебральных нейростимуляторов, внутриглазных и кохлеарных имплантатов и инфузионных насосов [17]. Другие возможные области применения для производителей бетавольтаических батарей включают электронные медицинские метки *in vivo* и системы интерфейса мозг-компьютер.

Медицинские устройства миниатюрного размера с длительным автономным питанием имеют высокий потенциал по снижению расходов и смягчению травм, связанных с инвазивными операциями по их имплантации. Бетавольтаические источники питания не требуют обслуживания в течение длительного времени и позволяют реализовать электропитание различных устройств в системах здравоохранения и удаленного мониторинга. В целом создание бетавольтаических комплексов является одной из актуальных фронтальных задач современной инженерии [18–20].

В настоящей статье представлены результаты разработки и испытаний программно-конфигурируемого испытательного стенда, предназначенного для подбора требуемой конфигурации бетавольтаических сборок (в зависимости от типа медицинского устройства, режимов его работы и требуемой мощности) и аппаратной реализации конечных устройств – бетавольтаических комплексов, обеспечивающих автономное питание медицинского Интернета вещей.

Задача проводимого исследования заключалась в разработке испытательного стенда, включая аппаратные и программные составляющие, обеспечивающие ступенчатое повышение напряжения, проверку зарядно-разрядных характеристик бетавольтаическихборок, потребления энергии с бетавольтаическихборок, измерения выходного напряжения, управления параметрами преобразования напряжения.

Материалы и методы

Устройства медицинского Интернета вещей связаны с облачными платформами и сервисами, которые хранят и анализируют собранные ими данные. Инструменты Интернета вещей трансформируют систему оказания медицинских услуг благодаря своей способности собирать, интерпретировать и распространять медицинские данные. Реализация их автономного питания возможна с использованием бетавольтаических комплексов, в основе которых лежит бетавольтаический источник питания, сопряженный с заряжаемыми ионисторами (накопителями энергии), при котором процессы заряда и разряда контролируются микроконтроллером.

Конструкция бетавольтаического комплекса предполагает его использование в качестве источника питания для беспроводных устройств слабой мощности, например, беспроводных датчиков медицинского Интернета вещей. Для разрабатываемого комплекса необходимо предусмотреть циклический режим работы, направленный на поддержание рабочего напряжения на выходном накопителе электрической схемы. Коммутация бетавольтаических сборок в схеме преобразования осуществляется с помощью полевых транзисторов. Сборки коммутируются с промежуточным накопителем. Преобразование напряжения осуществляется ступенчато с промежуточным накоплением энергии.

В рамках данного исследования был разработан программно-конфигурируемый испытательный стенд. Схема электрическая структурная представлена на рис. 1.

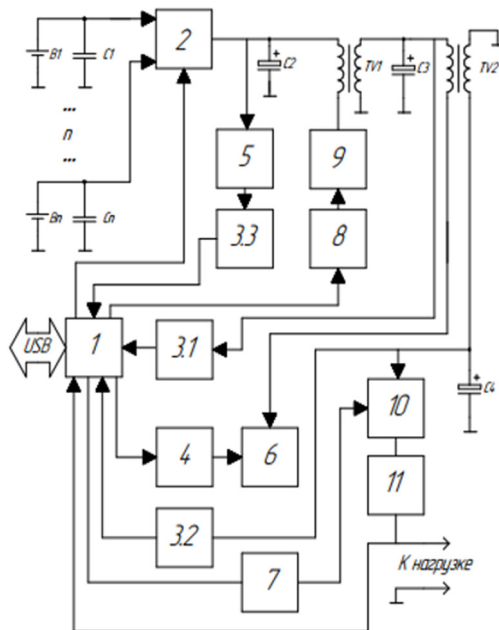


Рис. 1. Схема электрическая структурная испытательного стенда

В состав программно-конфигурируемого испытательного стенда входят управляющая плата и плата подключения бетавольтаических сборок.

На плате управления предусмотрены разъем подключения к ПК по интерфейсу USB и разъем питания. Размещение электронных плат предусмотрено в пластиковом корпусе. Значения напряжений, измеренных в процессе работы комплекса, записываются в flash-памяти микроконтроллера для дальнейшей передачи их на персональный компьютер.

В разработанном испытательном стенде предусмотрена централизованная структура. Схема работает следующим образом: напряжение с бетавольтаической сборки через мультиплексор подается на первичную обмотку трансформатора. Ключ, управляемый микроконтроллером, формирует импульсы напряжения. Через индуктивную связь на вторичной обмотке формируются импульсы более высокого напряжения, накапливаемого на конденсаторе. Вторая ступень повышения напряжения состоит из аналогичных элементов (трансформатор, ключ, конденсатор, схема управления ключевым элементом). Принцип ее работы идентичен вышеописанному. Третья ступень повышения напряжения реализована на step-up конвертере, ключевом элементе и схеме управления ключевым элементом.

Схема измерения реализована на усилителе и АЦП. Измерение напряжения осуществляется в четырех точках – на конденсаторах и на выходе схемы. Измерение тока осуществляется на выходе схемы.

Проведение испытаний программно-конфигурируемого испытательного стенда включает проверку следующих функциональных возможностей: накопление энергии для потребления тока в импульсном режиме и циклическое переключение между энергопреобразователями электрического тока (бетавольтаическими сборками) при достижении порогового значения напряжения посредством управляющего программного обеспечения.

Для повышения напряжения, получаемого с выходных контактов бетавольтаической сборки, была выбрана схема импульсного преобразователя напряжения (см. рис. 2). Суть схемы

заключается в формировании импульсов тока, которые затем подаются на первичную обмотку трансформатора. В предлагаемой схеме формирователем импульсов является МОП-транзистор с низким зарядом затвора STP32L06 или аналог со схожими характеристиками. Емкость затвора – 25 пС.

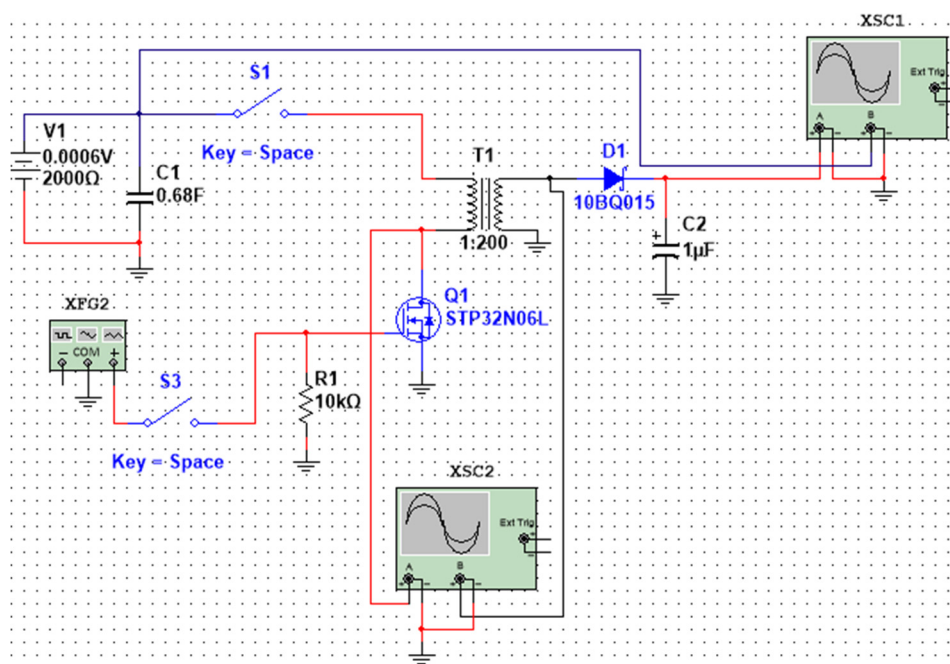


Рис. 2. Схема электрическая повышения напряжения, получаемого с выходных контактов бетавольтаической сборки

Реализация процесса управления и измерения осуществлена на микроконтроллере STM32F103, выбор данного контроллера обоснован достаточным для контроля напряжения в ключевых точках встроенных каналов АЦП, 10 каналов, наличием 7 таймеров для тактирования ключей, а также аппаратной реализацией интерфейса USB, что снижает номенклатуру изделий, входящих в состав комплекса.

Для коммутации на первых ступенях повышения напряжения используется схема транзисторного преобразователя. Измерение напряжений на первых ступенях повышения проводится с помощью усилителей, реализованных на интегральных микросхемах. Напряжения на конечной и промежуточной ступенях повышения напряжения подаются на входы АЦП.

Результаты

Разработанный программно-конфигурируемый испытательный стенд обеспечивает следующие функции: коммутация бетавольтаических сборок, преобразование напряжения, накопление-аккумулирование энергии, измерение напряжения, контроль напряжения и тока на выходе схемы преобразования, контроль процесса преобразования напряжения и графическое отображение параметров комплекса на экране ПК. Разработанный испытательный стенд приведен на рис. 3.

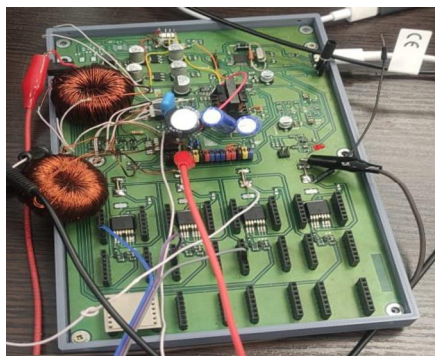


Рис. 3. Реализация испытательного стенда на печатной плате

Для управления испытательным стендом было разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом пользователя. Разработка программного обеспечения испытательного стенда осуществлялась в среде разработки PDE (Processing Development Environment). Язык разработки – Processing, на базе Java. Программное обеспечение предназначено для отображения состояния испытательного стенда, отображения значений напряжений на промежуточных накопителях, отображения значений тока и напряжения на выходе комплекса, и управления режимами преобразования напряжения. Вид пользовательского интерфейса рабочего окна программы представлен на рис. 4.



Рис. 4. Вид окна управляющего ПО

Функции управляющего программного обеспечения:

- запуск и остановка преобразования напряжения;
- установка напряжения запуска генерации. В окне программы задается напряжение, определяющее порог включения импульсного преобразователя;
- установка частоты импульсного преобразователя;
- отображение напряжения и тока на выходе ступеней повышения в виде графика и числом в окне программы;
- сохранение полученных данных в виде файла формата txt.

В левом верхнем углу окна отображается индикатор подключения к стенду. В левой верхней части также расположено окно для ввода значения порогового напряжения переключения между бетавольтаическими сборками. Под обозначениями ступеней находятся окно, отображающее напряжение в данной точке, окно ввода периодичности импульсов и окно ввода частоты. Ниже расположена кнопка запуска преобразования данной ступени с установленной пользователем частотой. В нижнем поле в виде графика отображаются напряжения на контролируемых участках или ток на выходе комплекса в зависимости от выбранного пользователем режима отображения.

Система предназначена для преобразования электрических параметров бетавольтаической сборки до уровня, при котором возможно ее использование в качестве источника питания для малопотребляющих электронных устройств в импульсных режимах работы. Система работает в двух параллельных режимах. Первый – режим измерения. В системе реализовано измерение напряжения на каждой ступени повышения. Измеренное напряжение отображается

в виде графика в окне программы. Второй – режим повышения напряжения. В этом режиме система за счет импульсных трансформаторных преобразователей повышает напряжение и накапливает его на промежуточных конденсаторах.

Управление ступенями повышения напряжения реализовано путем изменения частоты переключения транзисторов, коммутирующих напряжение на импульсных трансформаторах. Также осуществляется автоматическое отключение режима генерации при достижении порогового напряжения на входе преобразователя каждой ступени. Диагностика аппаратного комплекса заключается в измерении частот в контрольных точках схемы, а именно на затворах транзисторов импульсных преобразователей.

Для проверки работоспособности испытательного стенда были проведены его испытания с использованием бетавольтаических сборок в целях проверки реализации основных принципов работы бетавольтаического комплекса на площадке ГНЦ НИИАР г. Димитровград. Для повышения входных характеристик бетавольтаического источника питания использовался заряжаемый ионистор (суперконденсатор) в качестве вторичного источника энергии. Бетавольтаическая сборка представляет собой бетавольтаический источник питания сопряженный с суперконденсатором.

Проведение испытаний стенда проводилось на компьютере со следующими характеристиками и конфигурацией: ОС MS Windows 10 x32/x64, RAM: 512 2048 Mb, HDD: 80Gb. В качестве нагрузки в составе стенда предусмотрен маломощный светодиод, позволяющий визуально оценить работоспособность системы.

В результате испытаний установлено, что при достижении порогового напряжения, заданного в ПО испытательного стенда, на осциллограмме наблюдается скачок напряжения. При запуске ступеней преобразования на осциллограммах затворов наблюдаются импульсы. На осциллограммах, снятых с накопителей энергии на каскадах, наблюдается рост напряжения. Отсутствует влияние опорного напряжения от внешнего источника питания на значения тока и напряжения на выходе испытательного стенда. Таким образом, испытательный стенд стабильно работает при подключении нагрузки на выход и позволяет обеспечивать питанием малопотребляющие электронные устройства.

Обсуждение

В качестве варианта миниатюрного исполнения бетавольтаической сборки может использоваться металлический корпус с размещением бетавольтаических источников питания в сочетании с заряжаемыми ионисторами (суперконденсаторами), как показано на рис. 5.

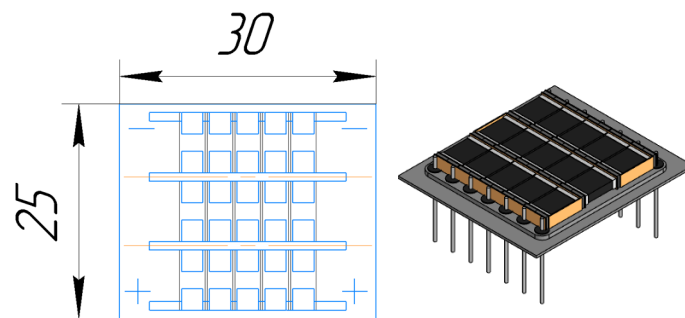


Рис. 5. Пример размещения БВЭП в металлическом корпусе, сопряженный с заряжаемыми ионисторами производства компании TDK (перезаряжаемый твердотельный аккумулятор Cera Charge для поверхностного монтажа)

Данный подход придает компактному накопителю более широкие возможности, например, использование его энергии для импульсных мониторинговых датчиков с возможностью передачи информации от устройств, работающих в автономном режиме, или в медицинских нейрофизиологических целях.

При проведении испытаний заявленные характеристики стенда показали удовлетворительные результаты. Это дает основания считать использование предложенного решения подходящим для работы с бетавольтаическими сборками для проведения экспериментальных исследований и отладки режимов работы бетавольтаического комплекса для получения необходимых значений тока и напряжения на выходе и дальнейшего проектирования конечного устройства для обеспечения автономного питания устройств медицинского назначения.

Напряжение бетавольтаических сборок (бетавольтаический источник питания сопряженный с заряжаемым ионистором) на входе схемы испытательного стенда составляло 26,06 мВ. Пороговое значение напряжения для переключения на следующую бетавольтаическую сборку осуществлялось при достижении напряжения 13,03 мВ. Периодичность переключения составила 12 с с частотой 59 кГц (рис. 6, 7).

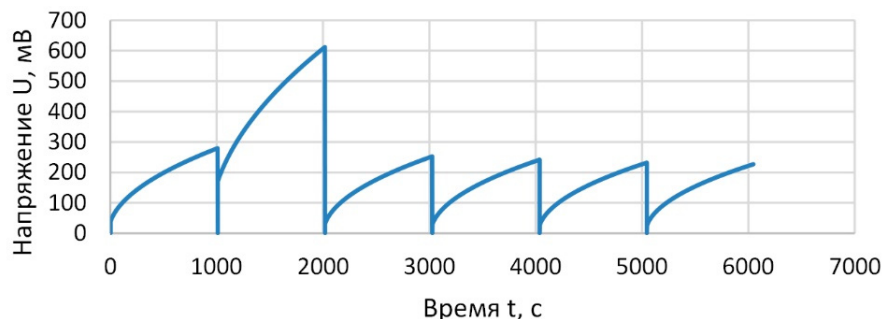


Рис. 6. Напряжение на первом каскаде схемы усиления испытательного стенда

На первом каскаде осуществлялось накопление напряжения с промежутком 1000 секунд с передачей его на второй каскад: в промежутке времени с 0 до 1000 секунды равного 279 мВ, в промежутке с 1000 до 2000 секунды равного 612 мВ, в промежутке с 2000 до 3000 секунды равного 252 мВ, в промежутке с 3000 до 4000 секунды равного 241 мВ, в промежутке с 4000 до 5000 секунды равного 232 мВ, в промежутке с 5000 до 6000 секунды равного 226 мВ.

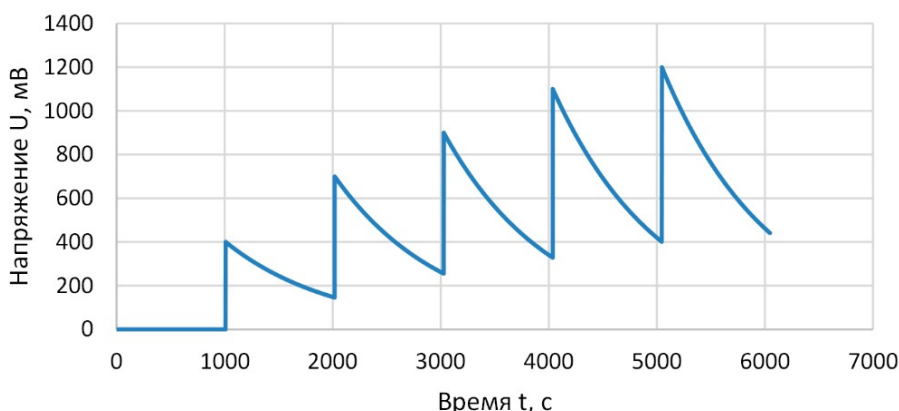


Рис. 7. Напряжение на втором каскаде схемы усиления испытательного стенда

На втором каскаде каждые 1000 секунд достигается пиковое значение напряжения и после 5000 секунды передается на step-up конвектор: в 1000 секунду достигается пиковое значения напряжения 400 мВ, в 2000 секунду пиковое значение напряжения достигает 700 мВ, в 3000 секунду пиковое значение напряжения достигает 900 мВ, в 4000 секунду пиковое напряжение достигает 1100 мВ, в 5000 секунд пиковое значение напряжения достигает 1200 мВ.

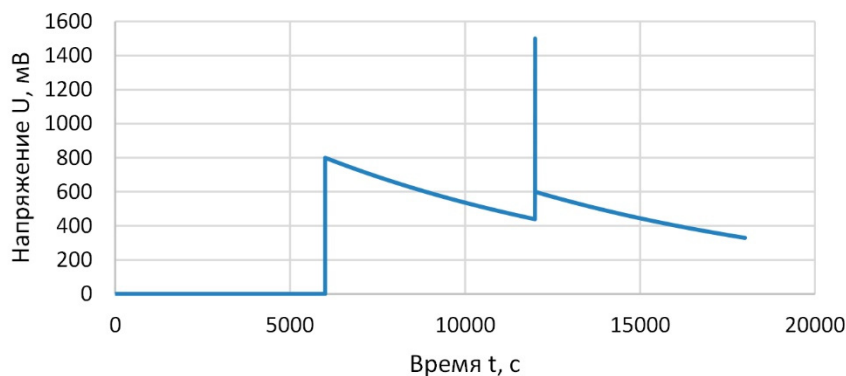


Рис. 8. Напряжение на выходе испытательного стенда

На 6000 секунде со второго каскада энергия передается на step-up конвертор. Выходное напряжение составило 1500 мВ на 12 000 секунде (рис. 8).

При включении нагрузки срабатывает светодиод, реализованный индикатор испытательного стенда, что свидетельствует о том, что реализованная схема преобразования напряжения с бетавольтаических сборок работает.

Описанный выше подход и аппаратная реализация испытательного стенда для конфигурирования работы бетавольтаических сборок предложены впервые. Такой подход позволяет, с одной стороны, повысить удельную мощность бетавольтаического источника питания, с другой – обеспечить автономное питание устройством медицинского Интернета вещей в импульсном режиме.

Полученные результаты в целом согласуются с аналогичными исследованиями [21] и позволяют реализовать исследование и отладку режимов работы бетавольтаического комплекса для получения необходимых значений тока и напряжения на выходе устройств медицинского назначения.

Преимуществом использования бетавольтаического источника питания в качестве первичного источника тока является практически неограниченный источник энергии в течение длительного периода времени.

Таким образом, разработка систем электропитания устройств медицинского Интернета вещей на основе бетавольтаических источников питания представляется перспективной задачей в рамках общего тренда развития цифрового и персонализированного здравоохранения.

Заключение

Разработанный испытательный стенд и результаты проведенных испытаний показали возможность использования бетавольтаических источников питания в сочетании со вторичными источниками энергии – заряжаемыми ионисторами для решения проблемы ограниченной мощности бетавольтаических источников питания за счет программного конфигурирования. Программное конфигурирование режимов работы преобразователя напряжения позволяет отладить режим работы бетавольтаических сборок под решение задач дальнейшей аппаратной реализации законченного устройства требуемых типоразмеров – бетавольтаического комплекса, обеспечивающего автономное импульсное питание устройств медицинского Интернета вещей.

Реализация технологии медицинского Интернета вещей, объединяющего сеть взаимосвязанных датчиков, носимых устройств, медицинских приборов и клинических систем позволяет различным медицинским приложениям снижать расходы на здравоохранение, обеспечивать оперативное реагирование на чрезвычайные ситуации и улучшать качество медицинского обслуживания. Внедрение систем организации автономного питания датчиков контроля состояния оборудования с использованием бетавольтаических комплексов, позволит увеличить темпы развития медицинского Интернета вещей.

Умные медицинские устройства с автономным электропитанием, такие как носимые мониторы и сенсоры, позволят отслеживать состояние пациентов в режиме реального времени, что особенно важно для хронических больных и пожилых людей. Телемедицина, основанная на технологиях медицинского Интернета вещей, предоставляет возможность удаленного консультирования и диагностики, расширяя доступ к медицинской помощи.

Список литературы

1. Аксенова Е. И., Горбатов С. Ю. Интернет медицинских вещей (IoMT): новые возможности для здравоохранения. М. : НИИОЗММ ДЗМ, 2021. 36 с.
2. Ashfaq Z., Rafay A., Mumtaz R. [et al.]. A review of enabling technologies for Internet of Medical Things (IoMT) Ecosystem // Ain Shams Engineering Journal. 2022. Vol. 13. P. 101660. doi: 10.1016/j.asej.2021.101660
3. Mathkor D., Mathkor N., Bassfar Z. [et al.]. Multirole of the Internet of Medical Things (IoMT) in biomedical systems for managing smart healthcare systems: an overview of current and future innovative trends // Journal of Infection and Public Health. 2024. Vol. 17, iss. 4. P. 559–572. doi: 10.1016/j.jiph.2024.01.013
4. Nishad D., Tripathi D. Internet of Medical Things (IoMT): applications and challenges // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT). 2020. Vol. 11. P. 2885–2889. doi: 10.61841/turcomat.v11i3.14654

5. Dwivedi R., Mehrotra D., Chandra S. Potential of Internet of Medical Things (IoMT) applications in building a smart healthcare system: A systematic review // *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2022. Vol. 12, iss. 2. P. 302–318. doi: 10.1016/j.jobcr.2021.11.010
6. Vishnu S., Ramson S. R. J., Jegan R. Internet of Medical Things (IoMT) – an overview // 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS) (Coimbatore, India, 2020). 2020. P. 101–104. doi: 10.1109/ICDCS48716.2020.243558
7. Sindhuja R., Kapse S., Kapse S. A survey of Internet of Medical Things (IoMT) applications, architectures and challenges in smart healthcare systems // *ITM Web of Conferences*. 2023. Vol. 56. P. 05013. doi: 10.1051/itmconf/20235605013
8. Joyia G., Liaqat R., Farooq A., Rehman S. Internet of Medical Things (IOMT): applications, benefits and future challenges in healthcare domain // *Journal of Communications*. 2017. Vol. 12. P. 240–247. doi: 10.12720/jcm.12.4.240-247
9. Askar N., Habbal A., Mohammed A. [et al.]. Architecture, protocols, and applications of the Internet of Medical Things (IoMT) // *Journal of Communications*. 2022. Vol. 17. P. 900–918. doi: 10.12720/jcm.17.11.900-918
10. Pradyumna G. R., Hegde R. B., Bommegowda K. B. [et al.]. Empowering healthcare with IoMT: evolution, machine learning integration, security, and interoperability challenges // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 20603–20623. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3362239
11. Kim H., Lee J., Lee S. [et al.]. Multiple-year battery based on highly efficient and stable dual-site radioactive isotope dye-sensitized betavoltaic cell // *Journal of Power Sources*. 2024. Vol. 606. P. 234427. doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234427
12. Цветков Л. А., Цветков С. Л., Пустовалов А. А. [и др.]. Радионуклиды для β -вольтаических атомных батарей (миниатюрных, энергоемких, с многолетним сроком службы) // *Радиохимия*. 2022. Т. 64, № 3. С. 281–288.
13. Olsen L. C. Betavoltaic energy conversion // *Energy Conversion*. 1973. Vol. 13, № 4. P. 117–124. doi: 10.1016/0013-7480(73)90010-7
14. Mohamadian M., Feghhi S.A.H., Afarideh H. Conceptual design of GaN betavoltaic battery using in cardiac pacemaker // 13th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems 2007, ICENES 2007.
15. Miley G., Luo N. Betavoltaic battery for industry and medicine use employing isotopes from nuclear reactor and weapon waste // *Transactions of the American Nuclear Society*. 2010. Vol. 103. P. 1168–1169
16. Altana C., Cottone F., Mengoni D. First simulations on higher-efficiency betavoltaic battery integrated with electrets for space, medicine and remote sensing applications // 21st International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS). 2022. P. 245–247. doi: 10.1109/PowerMEMS56853.2022.10007077
17. Betavoltaic Cell Market – Global Industry Size, Share, Trends, Opportunity and Forecasted, 2018–2028. URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/04/26/2655312/0/en/Betavoltaic-Cell-Market-Global-Industry-Size-Share-Trends-Opportunity-and-Forecasted-2018-2028.html> (дата обращения: 04.02.2025).
18. Daruich de Souza C., Kim J. B., Kim J. [et al.]. The basics of betavoltaic nuclear batteries // *International Journal of Current Advanced Research*. 2021. Vol. 10, № 11. P. 12. doi: 10.24327/ijcar.2021.25544.5098
19. Krasnov A. A., Legotin S. Advances in the development of betavoltaic power sources (a review) // *Instruments and Experimental Techniques*. 2020. Vol. 63, № 4. P. 437–452. doi: 10.1134/S0020441220040156
20. Yakimov E. Prediction of Betavoltaic Battery Parameters // *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 3740. doi: 10.3390/en16093740
21. Рисованный В. Д., Костылев А. И., Душин В. Н. [и др.]. Атомные батареи конденсаторного типа нового поколения с жидким электролитом // *Атомная энергия*. 2022. Т. 132, № 3. С. 175–178

References

1. Aksenova E.I., Gorbato S.Yu. *Internet meditsinskikh veshchey (IoMT): novye vozmozhnosti dlya zdoravookhraneniya = Internet of Medical Things (IoMT): new opportunities for healthcare*. Moscow: NII OZMM DZM, 2021:36. (In Russ.)
2. Ashfaq Z., Rafay A., Mumtaz R. et al. A review of enabling technologies for Internet of Medical Things (IoMT) Ecosystem. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022;13:101660. doi: 10.1016/j.asej.2021.101660
3. Mathkor D., Mathkor N., Bassfar Z. et al. Multirole of the Internet of Medical Things (IoMT) in biomedical systems for managing smart healthcare systems: an overview of current and future innovative trends. *Journal of Infection and Public Health*. 2024;17(4):559–572. doi: 10.1016/j.jiph.2024.01.013
4. Nishad D., Tripathi D. Internet of Medical Things (IoMT): applications and challenges. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*. 2020;11:2885–2889. doi: 10.61841/turcomat.v11i3.14654
5. Dwivedi R., Mehrotra D., Chandra S. Potential of Internet of Medical Things (IoMT) applications in building a smart healthcare system: A systematic review. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2022;12(2):302–318. doi: 10.1016/j.jobcr.2021.11.010

6. Vishnu S., Ramson S.R.J., Jegan R. Internet of Medical Things (IoMT) – an overview. *5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS) (Coimbatore, India, 2020)*. 2020:101–104. doi: 10.1109/ICDCS48716.2020.243558
7. Sindhuja R., Kapse S., Kapse S. A survey of Internet of Medical Things (IoMT) applications, architectures and challenges in smart healthcare systems. *ITM Web of Conferences*. 2023;56:05013. doi: 10.1051/itmconf/20235605013
8. Joyia G., Liaqat R., Farooq A., Rehman S. Internet of Medical Things (IOMT): applications, benefits and future challenges in healthcare domain. *Journal of Communications*. 2017;12:240–247. doi: 10.12720/jcm.12.4.240-247
9. Askar N., Habbal A., Mohammed A. et al. Architecture, protocols, and applications of the Internet of Medical Things (IoMT). *Journal of Communications*. 2022;17:900–918. doi: 10.12720/jcm.17.11.900-918
10. Pradyumna G.R., Hegde R.B., Bommegowda K.B. et al. Empowering healthcare with IoMT: evolution, machine learning integration, security, and interoperability challenges. *IEEE Access*. 2024;12:20603–20623. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3362239
11. Kim H., Lee J., Lee S. et al. Multiple-year battery based on highly efficient and stable dual-site radioactive isotope dye-sensitized betavoltaic cell. *Journal of Power Sources*. 2024;606:234427. doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234427
12. Tsvetkov L.A., Tsvetkov S.L., Pustovalov A.A. et al. Radionuclides for β -voltaic atomic batteries (miniature, energy-intensive, with a long service life). *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 2022;64(3):281–288. (In Russ.)
13. Olsen L.C. Betavoltaic energy conversion. *Energy Conversion*. 1973;13(4):117–124. doi: 10.1016/0013-7480(73)90010-7
14. Mohamadian M., Feghhi S.A.H., Afarideh H. Conceptual design of GaN betavoltaic battery using in cardiac pacemaker. *13th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems 2007, ICENES*. 2007.
15. Miley G., Luo N. Betavoltaic battery for industry and medicine use employing isotopes from nuclear reactor and weapon waste. *Transactions of the American Nuclear Society*. 2010;103:1168–1169.
16. Altana C., Cottone F., Mengoni D. First simulations on higher-efficiency betavoltaic battery integrated with electrets for space, medicine and remote sensing applications. *21st International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS)*. 2022:245–247. doi: 10.1109/PowerMEMS56853.2022.10007077
17. *Betavoltaic Cell Market – Global Industry Size, Share, Trends, Opportunity and Forecasted, 2018–2028*. Available at: <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/04/26/2655312/0/en/Betavoltaic-Cell-Market-Global-Industry-Size-Share-Trends-Opportunity-and-Forecasted-2018-2028.html> (accessed 04.02.2025).
18. Daruich de Souza C., Kim J.B., Kim J. et al. The basics of betavoltaic nuclear batteries. *International Journal of Current Advanced Research*. 2021;10(11):12. doi: 10.24327/ijcar.2021.25544.5098
19. Krasnov A.A., Legotin S. Advances in the development of betavoltaic power sources (a review). *Instruments and Experimental Techniques*. 2020;63(4):437–452. doi: 10.1134/S0020441220040156
20. Yakimov E. Prediction of Betavoltaic Battery Parameters. *Energies*. 2023;16:3740. doi: 10.3390/en16093740
21. Risovanny V.D., Kostylev A.I., Dushin V.N. et al. New generation capacitor type nuclear batteries with liquid electrolyte. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2022;132(3):175–178. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Земцов

аспирант,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: zemtsov.fond@gmail.com

Vladimir V. Zemtsov

Postgraduate student,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Антон Владимирович Иващенко

доктор технических наук, профессор,
директор Передовой медицинской
инженерной школы,
Самарский государственный
медицинский университет
(Россия, г. Самара, ул. Чапаевская, 89)
E-mail: anton.ivashenko@gmail.com

Anton V. Ivaschenko

Doctor of technical sciences, professor,
director of the Higher School of Medical
Engineering,
Samara State Medical University
(89 Chapaevskaya street, Samara, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 17.04.2025

Принята к публикации/Accepted 29.04.2025