

Разработка электронного устройства для мониторинга физических параметров специализированных грузов при их транспортировке

А. А. Ухов[✉], Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов, В. А. Симон

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ aauhov@yandex.ru

Аннотация. Специализированные грузы требуют соблюдения особых условий хранения и транспортировки, что вызывает необходимость использования специальных электронных устройств, размещаемых вместе с грузом. Данные устройства мониторинга измеряют критичные для груза физические параметры, осуществляют ведение журнала, а также фиксируют события выхода параметров за допустимые пределы. В данной статье рассматривается разработка устройства для контроля температуры, относительной влажности воздуха и ударных нагрузок, пригодного для использования в процессе транспортировки специализированных грузов. Основой устройства служит микроконтроллер, поддерживающий технологию Bluetooth Low Energy на программном и аппаратном уровнях. Для измерения параметров окружающей среды используются датчики температуры, влажности и ускорения, имеющие цифровой интерфейс. Журнал событий сохраняется на съемную карту памяти. В конструкции и алгоритме работы устройства предусмотрена защита от фальсификации регистрируемых данных, в том числе присутствует датчик вскрытия корпуса. Программное обеспечение микроконтроллера базируется на операционной системе реального времени FreeRTOS. Зависимость потребляемого устройством тока от времени имеет импульсный характер, при этом амплитуда импульсов достигает сотен миллиампер, в промежутке между импульсами ток составляет сотни микроампер, а длительность этого промежутка может составлять единицы–десятки секунд. Ожидаемое время автономной работы устройства в режиме мониторинга составляет более 40 сут.

Ключевые слова: специализированный груз, условия транспортировки, мониторинг физических параметров, контроль температуры, относительная влажность, ударные нагрузки, автономная работа

Для цитирования: Разработка электронного устройства для мониторинга физических параметров специализированных грузов при их транспортировке / А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов, В. А. Симон // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 3. С. 44–54. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-44-54.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Development of an Electronic Device for Monitoring the Physical Parameters of Specialized Cargoes During Their Transportation

A. A. Uhov[✉], D. K. Kostrin, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, V. A. Simon

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ aauhov@yandex.ru

Abstract. Specialized cargoes require compliance with special storage and transportation conditions, which necessitates the use of special electronic devices placed with the cargo. These monitoring devices measure the physical parameters critical for the cargo, carry out logging, and also record events when the parameters exceed the permissible limits. In this paper, the development of a device for controlling temperature, relative humidity and shock loads, suitable for use in the transportation of specialized goods is considered. The basis of the device is a microcontroller that supports Bluetooth Low Energy technology at the software and hardware levels. Tempera-

ture, humidity and acceleration sensors with a digital interface are used to measure environmental parameters. The event log is saved to a removable memory card. The design and algorithm of the device provides protection against falsification of recorded data, including the presence of a sensor for opening the case. The microcontroller's software is based on the FreeRTOS real-time operating system. The dependence of the current consumed by the device on time has a pulse character, while the pulse amplitude reaches hundreds of milliamperes, in the interval between pulses the current is hundreds of microamperes, and the duration of this interval can be units-tens of seconds. The expected battery life of the device in monitoring mode is more than 40 days.

Keywords: specialized cargo, transportation conditions, monitoring of physical parameters, temperature control, relative humidity, shock loads, autonomous operation

For citation: Development of an Electronic Device for Monitoring the Physical Parameters of Specialized Cargoes During Their Transportation / A. A. Uhov, D. K. Kostin, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, V. A. Simon // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no 3. P. 44–54. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-44-54.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Один из основных элементов логистической цепи, благодаря которой товар поступает от производителя к конечному потребителю, – это транспортировка груза. Некоторые виды специализированных грузов требуют соблюдения особых условий транспортировки на всем ее протяжении [1], [2]. Наиболее часто предъявляются требования к температуре и влажности окружающего воздуха. Кроме того, при перемещении хрупких объектов важно обеспечить отсутствие перегрузок и ударов.

Для контроля соблюдения перевозчиком данных требований могут использоваться специальные электронные устройства, которые размещаются вместе с грузом, например внутри упаковки [3]–[5]. Они измеряют критичные для груза параметры, осуществляют ведение журнала этих параметров, а также фиксируют события выхода параметров за допустимые пределы.

Такие устройства могут быть оснащены датчиками различных типов, что позволяет им регистрировать любые физические величины [6]. Наибольшее распространение получили устройства контроля:

- температуры и влажности;
- атмосферного давления;
- ударных нагрузок;
- освещенности (в том числе ультрафиолетового излучения);
- содержания углекислого газа.

Цель данной статьи заключается в разработке устройства для мониторинга температуры, относительной влажности воздуха и ударных нагрузок, пригодного для использования в процессе транспортировки специализированных грузов.

Разработка электронного устройства мониторинга. Для того чтобы сформулировать набор требований, которым должно удовлетворять разрабатываемое устройство, рассмотрим типичный порядок его применения:

1. Производится настройка устройства, задаются необходимые параметры контроля.

2. Устройство отправляется вместе с грузом (контролируемым объектом), например, помещается внутрь упаковки. Непосредственно перед отправкой запускается процесс мониторинга и ведения журнала событий.

3. Устройство измеряет температуру и влажность воздуха, а также ускорение (ударные нагрузки), сохраняет результаты измерений в журнале и контролирует, находятся ли данные параметры в допустимых пределах.

4. При получении груза получатель запрашивает данные о нарушении условий транспортировки.

5. В случае обнаружения нарушений, просматривая сохраненный журнал, можно определить точное время события и значение параметра в момент нарушения.

На основании данного порядка, а также с учетом соображений о безопасности (т. е. о защите от фальсификации данных) и удобстве использования к разрабатываемому устройству предъявляются следующие требования:

– устройство должно обеспечивать измерение температуры и влажности воздуха, а также ускорения по трем осям;

– устройство должно определять выход измеренных значений за допустимые пределы;

– устройство должно сохранять журнал результатов измерений и событий на каком-либо носителе информации;

– устройство должно быть оснащено радиоканалом беспроводной технологии Bluetooth с низким энергопотреблением Bluetooth Low Energy (BLE) [7], [8], при помощи которого осуществляется настройка устройства, запуск и остановка мониторинга, а также получение информации о текущем состоянии;

– должна быть обеспечена защита от несанкционированного доступа по интерфейсу BLE к настраиваемым параметрам, а также приняты иные меры, предотвращающие фальсификацию данных;

– должен присутствовать датчик вскрытия корпуса, срабатывание которого приводит к созданию записи в журнале;

– устройство должно иметь малые габариты, быть автономным, иметь встроенный источник питания.

В соответствии с вышеизложенными требованиями была составлена структурная схема устройства, приведенная на рис. 1.

Основу устройства представляет микроконтроллер ESP32-C3, поддерживающий BLE на программном и аппаратном уровнях. Для измерения параметров окружающей среды используются датчики температуры, влажности и ускорения, имеющие цифровой интерфейс. Журнал событий сохраняется на съемную карту памяти стандарта MicroSD. В случае необходимости просмотра журнала карта памяти извлекается из устройства и подключается к персональному компьютеру. Датчик вскрытия корпуса представляет собой кнопку, толкатель которой механически связан с крышкой корпуса. При снятии крышки контакты кнопки размыкаются.

Устройство питается от литий-полимерного аккумулятора с номинальным напряжением 3.7 В

типа LP603048, емкость которого составляет 900 мА · ч. Для зарядки аккумулятора предусмотрен разъем Micro-USB, к которому подключается стандартный сетевой адаптер с выходным напряжением 5 В. Преобразователь напряжения формирует напряжение питания всех узлов схемы из напряжения аккумулятора. Коммутатор питания обеспечивает отключение датчиков и карты памяти для экономии энергии, а также переключает питание устройства на внешний источник при его наличии.

Используемый микроконтроллер должен поддерживать технологию BLE, иметь интерфейс I²C для обмена данными с датчиками, интерфейс SPI или SDIO для подключения карты памяти, модуль часов реального времени Real Time Clock (RTC) для фиксации времени возникновения событий, модуль аналого-цифрового преобразования для контроля напряжения аккумулятора, а также обладать режимами пониженного энергопотребления.

Этим требованиям удовлетворяет микроконтроллер ESP32-C3, который в устройстве применяется в составе модуля ESP-C3-32S. Данный модуль представляет собой мезонинную плату, на которой расположен микроконтроллер ESP32-C3FN4 (модификация со встроенной флэш-памятью объемом 4 Мбайт), кварцевый резонатор, LC-фильтры в цепях питания, выполненная печатным способом антенна для диапазона 2.4 ГГц и согласующая π-цепочка. Применение такого модуля упрощает разработку устройства, поскольку в этом случае не требуется проводить расчеты высокочастотных цепей.

Для измерения температуры и влажности был выбран датчик HDC1080, содержащий полупроводниковые датчики относительной влажности воздуха и температуры, аналого-цифровой преоб-

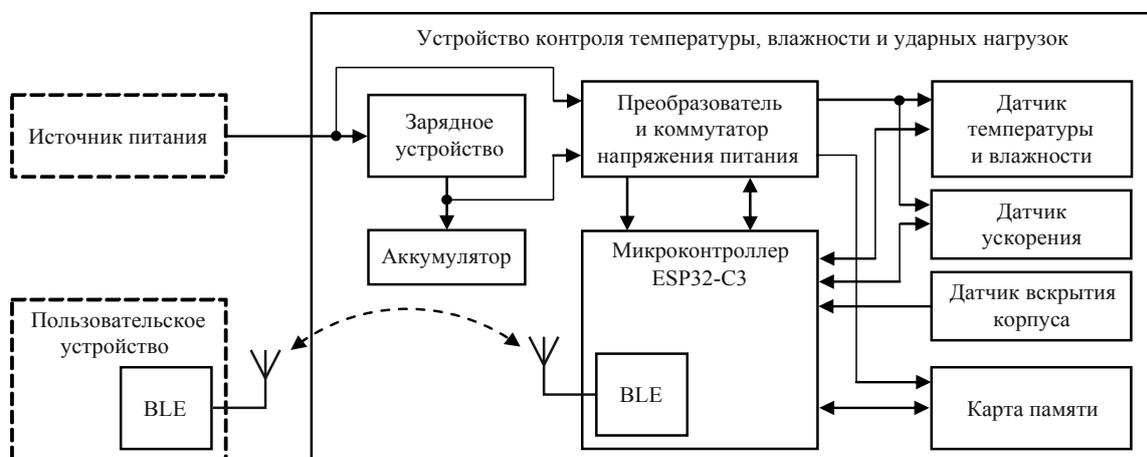


Рис. 1. Структурная схема устройства мониторинга температуры, влажности и ударных нагрузок
Fig. 1. Block diagram of a temperature, humidity and shock monitoring device

разователь, а также управляющую логику. Настройка датчика, запуск измерения и чтение результатов осуществляется через интерфейс I²C.

Диапазон измеряемых датчиком температур составляет $-20\dots+85$ °С. Погрешность измерения температуры в этом диапазоне не превышает ± 0.3 °С, а в диапазоне $+5\dots+60$ °С – ± 0.2 °С. Датчик способен измерять относительную влажность воздуха от 0 до 100 %. Погрешность не превышает ± 4 % во всем диапазоне измерений и ± 2 % в диапазоне от 20 до 60 %.

Для измерения ускорения и детектирования ударов применяется трехосевой цифровой акселерометр MMA8453Q, чувствительный элемент которого выполнен по технологии микроэлектромеханических систем. Данная микросхема измеряет значение ускорения в диапазоне ± 8 g. Разрядность встроенного аналого-цифрового преобразователя составляет 10 бит. Управление и чтение результатов измерения осуществляется по интерфейсу I²C.

Отличительная особенность микросхемы MMA8453Q заключается в наличии встроенного блока цифровой обработки сигналов, предназначенного для детектирования различных видов движения и перемещения, а также ориентации датчика по ускорению и его изменению во времени.

Для детектирования ударов удобно использовать режим обнаружения переходных процессов Transient Detection [9]. В этом режиме блок цифровой обработки сигналов анализирует значения ускорения по трем осям после прохождения сигналами фильтра высоких частот [10]. Если отфильтрованные величины превышают заданный порог в течение определенного времени, генерируется сигнал прерывания. Использование фильтра высоких частот позволяет устранить постоянную составляющую сигнала ускорения (ускорение свободного падения). Кроме того, в режиме Transient Detection данный фильтр может быть отключен, и с порогом будут сравниваться значения ускорения с учетом постоянной составляющей.

Для питания устройства применяется литий-полимерный аккумулятор, напряжение на котором может находиться в диапазоне от 3.0 (аккумулятор полностью разряжен) до 4.2 В (аккумулятор заряжен). Полная разрядка аккумулятора негативно сказывается на сроке его службы, поэтому целесообразно ограничить минимальное напряжение на нем значением 3.3 В. Это не окажет заметного влияния на доступную емкость аккумулятора, поскольку при напряжениях меньше 3.3 В он отдает лишь порядка 5 % запасенной энергии.

Печатная плата устройства (рис. 2) разрабатывалась для установки в корпус Gainta G201 или G302, имеющий габаритные размеры $64 \times 58 \times 35$ мм. Сложная форма контура платы позволяет наиболее эффективно использовать внутреннее пространство корпуса. Вокруг антенны 13 модуля ESP-C3-32S предусмотрено свободное пространство в соответствии с требованиями, приведенными в документации к модулю. Индикаторные светодиоды серий 1 и 11 TO-2106, имеющие боковое свечение, а также кнопка включения устройства 12 расположены по краям платы. Датчик вскрытия корпуса (кнопка 3) и разъемы 5 и 7 размещены таким образом, чтобы установленный над платой аккумулятор не перекрывал доступ к ним. Датчик температуры и влажности 10 установлен на максимально возможном расстоянии от источников тепла (микросхемы контроллера заряда 4 и стабилизатора напряжения 6), чтобы уменьшить влияние этих источников на результаты измерений [11]. Крепежные отверстия 8 диаметром 3.2 мм предназначены для фиксации платы в корпусе.

Разъем Micro-USB 9 и гнездо для карты MicroSD размещены друг напротив друга на разных сторонах печатной платы. В корпусе напротив них должно быть предусмотрено окно размерами 14.5×7.5 мм. В него устанавливается пылезащитная заглушка типа CJCXV-2. Паз 2 в печатной плате необходим для размещения выступающего элемента, проходящего насквозь через стенку корпуса и обеспечивающего фиксацию заглушки.

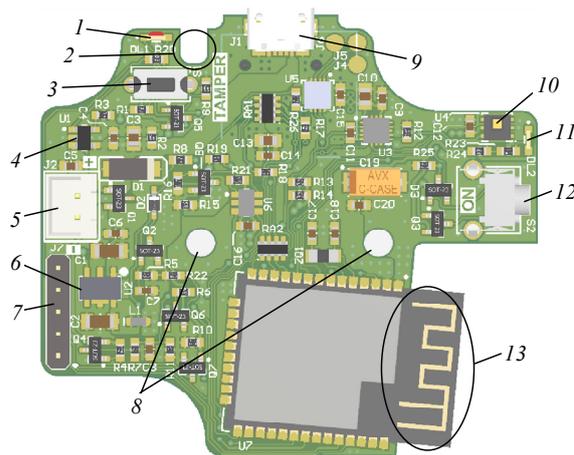


Рис. 2. Печатная плата устройства мониторинга (вид сверху)
Fig. 2. Printed circuit board of the monitoring device (top view)

Программное обеспечение микроконтроллера ESP32-C3 написано на языке программирования Си и основано на операционной системе реального времени FreeRTOS [12], [13], реализующей кооперативную (вытесняющую) многозадачность.

Алгоритм контроля физических параметров. Одна из функций программного обеспечения – мониторинг значений температуры t и относительной влажности воздуха RH , т. е. осуществление периодических измерений этих параметров и проверка условий выхода этих величин за допустимые пределы.

В исходном состоянии, когда выполняются условия транспортировки груза $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$ и $RH_{\min} \leq RH \leq RH_{\max}$, где t_{\min} , t_{\max} , RH_{\min} , RH_{\max} – минимальные и максимальные допустимые значения (пороги) температуры и относительной влажности, соответственно, производятся измерения параметров с периодом T_H . Результаты измерений передаются программным обеспечением для записи в журнал.

Если при очередном измерении хотя бы одно из указанных выше неравенств не выполняется, устанавливаются соответствующие флаги состояния, а также внутренние флаги активности порогов, показывающие, какие именно пороги в настоящий момент считаются превышенными.

Всякий раз при установке флага активности порога, который ранее был сброшен, устройство мониторинга переходит в режим тревоги, и обнуляется счетчик отсчетов температуры и влажности в этом режиме. Измерения теперь производятся с меньшим периодом T_T . Выход из режима тревоги (и возврат к нормальному периоду измерений T_H) происходит, когда все флаги активности сброшены или достигнуто предельное количество отсчетов N_T в режиме тревоги.

Сброс флагов активности порогов производится с учетом гистерезиса, т. е. проверяются условия $t \leq t_{\max} - \Delta t$, $t \geq t_{\min} + \Delta t$, $RH \leq RH_{\max} - \Delta RH$, $RH \geq RH_{\min} + \Delta RH$, где Δt и ΔRH – величины гистерезиса по температуре и влажности соответственно. Выполнение любого из этих условий приводит к сбросу соответствующего флага. Все четыре порога контролируются независимо. Кроме того, контроль некоторых порогов может быть отключен, в этом случае соответствующие флаги активности и флаги состояния никогда не будут установлены. Все параметры мониторинга температуры и влажности (t_{\min} , t_{\max} , Δt , RH_{\min} , RH_{\max} , ΔRH , T_H , T_T , N_T , а также набор контролируемых порогов) задаются при настройке регистратора посредством BLE.

Контроль ударных нагрузок реализован при помощи режима Transient Detection блока цифровой обработки сигналов акселерометра ММА8453Q. В этом режиме осуществляется непрерывное получение отсчетов ускорения с частотой дискретизации f_d . Отсчеты поступают на вход фильтра высоких частот с частотой среза f_{ϕ} . Ускорение a по каждой из трех осей на выходе фильтра сравнивается с пороговым (максимальным допустимым) значением ускорения a_{\max} . Если $a > a_{\max}$, значение внутреннего счетчика в ММА8453Q увеличивается на единицу. Если же $a \leq a_{\max}$, то значение счетчика либо уменьшается на единицу, либо обнуляется, в зависимости от выбранного режима. Изменение значения счетчика производится с периодом T_c .

Проекция ускорения на каждую из координатных осей контролируется независимо – в состав ММА8453Q входит три счетчика. При достижении любым счетчиком предварительно заданного значения N_c микросхема ММА8453Q формирует сигнал прерывания. Таким образом обнаруживаются ситуации, когда значение какой-либо из проекций ускорения превышает a_{\max} на протяжении интервала времени длительностью $T_c N_c$.

Программное обеспечение, получив уведомление из обработчика прерывания, активирует режим тревоги по ускорению. В этом режиме в журнал записываются последовательные отсчеты ускорения, получаемые с частотой f_d . Готовность очередного отсчета определяется при помощи прерывания. После получения N_y отсчетов режим тревоги деактивируется, и начинается отсчет времени неактивности T_o , в течение которого ускорения не контролируется. Это необходимо для ограничения числа записей в журнале при часто возникающих ударных нагрузках (например, при сильной тряске в процессе перевозки груза).

Параметры f_d , f_{ϕ} , T_c , a_{\max} , N_c , N_y , T_o , режим работы счетчика отсчетов, превышающих a_{\max} , а также состояние фильтра высоких частот (включен или отключен) задаются при настройке регистратора посредством BLE.

Все флаги состояния расположены в оперативной памяти модуля RTC, данные в которой сохраняются при переходе микроконтроллера в режим глубокого энергосбережения. Кроме того, при вскрытии корпуса, при уменьшении напря-

жения на аккумуляторе ниже критического уровня, а также если устройство выключается при запущенном ведении журнала, флаги состояния сохраняются во флэш-памяти микроконтроллера.

При включении устройства микроконтроллер анализирует данные в оперативной памяти RTC и во флэш-памяти, проверяет их целостность и восстанавливает сохраненные ранее значения флагов состояния. Учитывая, что почти все флаги не могут быть сброшены при запущенном мониторинге, информация об обнаруженных нарушениях условий перевозки груза, а также о попытке вскрытия корпуса или извлечения карты памяти может быть восстановлена при последующем включении устройства мониторинга.

В случаях, если была извлечена карта памяти или вскрыт корпус, невозможно гарантировать, что сохраненный на карте журнал содержит достоверную информацию. Однако эти события будут зафиксированы установкой соответствующих флагов, что будет свидетельствовать о попытке вмешательства в работу устройства мониторинга.

Сброс флагов состояния невозможен без прохождения авторизации, для чего должен быть известен пароль доступа. Таким образом, процедура авторизации и примененный принцип хранения и обработки флагов состояния обеспечивают защиту от фальсификации данных. Под такой защитой в данном случае понимается исключение возможно-

сти сокрытия того факта, что условия транспортировки груза, контролируемого устройством мониторинга, были нарушены или была произведена попытка вмешательства в работу устройства.

Испытания электронного устройства мониторинга. В процессе разработки устройства мониторинга проводились многократные экспериментальные проверки его работы, по результатам которых вносились изменения в конструкцию устройства и в программное обеспечение микроконтроллера. На начальных этапах разработки применялся прототип устройства, выполненный на макетной плате, а на завершающих этапах для проведения испытаний использовалось устройство, собранное на печатной плате заводского изготовления и помещенное в корпус. Для установки режимов работы устройства мониторинга было разработано веб-приложение, графический интерфейс которого показан на рис. 3.

Приложение позволяет подключаться к устройству мониторинга, выполнять процедуру авторизации, считывать текущее время и устанавливать часы реального времени, отправлять команды, считывать и записывать параметры мониторинга. Текущее состояние устройства (флаги состояния), результаты измерения температуры и влажности, а также уровень заряда аккумулятора отображаются в удобной для восприятия форме. Для создания веб-приложения использовалась эксперименталь-

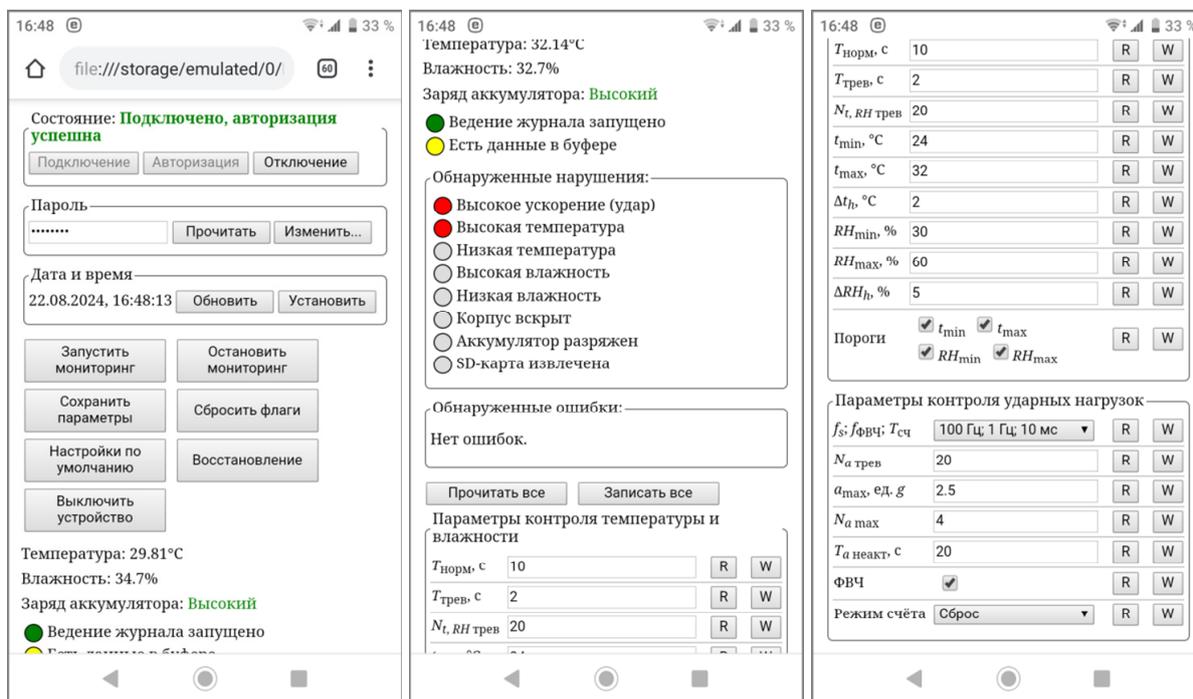


Рис. 3. Веб-приложение для управления устройством мониторинга

Fig. 3. Web application for monitoring device management

ная технология Web Bluetooth API [14], которая позволяет веб-странице взаимодействовать с устройствами Bluetooth.

Для проверки функционирования устройства в режиме мониторинга были заданы параметры контроля, после чего ведение журнала было запущено отправкой соответствующей команды. Далее устройство подвергалось внешним воздействиям, которые фиксировались как нарушения условий транспортировки в соответствии с заданными параметрами контроля. Спустя приблизительно 30 мин мониторинг был остановлен.

На рис. 4 приведены графики временных зависимостей температуры и влажности, построенные по данным записей в файле журнала. Штриховыми линиями показаны верхний порог по температуре $t_{\max} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нижний порог по влажности $RH_{\min} = 30\text{ }\%$. По плотности расположения маркеров на кривых видно, что при обнаружении каждого нового нарушения активируется режим тревоги, и период измерения уменьшается. Через некоторое время, когда будет выполнено $N_T = 20$ измерений, он возвращается к исходному значению. Обнаружение нарушений осуществляется с учетом гистерезиса, что также можно наблюдать на графике: в момент времени 16:58:42.751, когда влажность падает ниже 30 %, режим тревоги не активируется, поскольку с момента предыдущего нарушения нижнего порога по влажности условие $RH \geq RH_{\min} + \Delta RH = 32\text{ }\%$ не выполнялось. Таким образом, можно заключить, что алгоритм контроля температуры и влажности полностью соответствует описанному ранее.

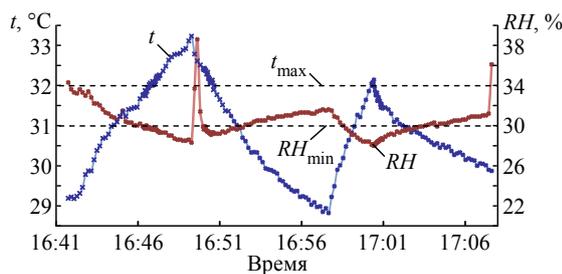


Рис. 4. Графики зависимостей температуры и относительной влажности во времени
Fig. 4. Graphs of temperature and relative humidity dependences over time

Завершающий этап испытаний устройства заключался в определении времени, в течение которого оно способно функционировать в режиме мониторинга автономно, т. е. без зарядки аккумулятора [15]. Это время можно вычислить, зная емкость аккумулятора (запасаемый заряд) Q и средний ток $I_{\text{ср}}$, потребляемый устройством:

$$T_{\text{раб}} = Q/I_{\text{ср}}.$$

Учитывая, что зависимость потребляемого устройством тока от времени $I(T)$ имеет импульсный характер (амплитуда импульсов достигает сотен миллиампер, в промежутке между импульсами ток составляет сотни микроампер, а длительность этого промежутка может составлять единицы–десятки секунд), непосредственно измерить $I_{\text{ср}}$ не представляется возможным.

Поэтому для определения $I_{\text{ср}}$ был проведен следующий эксперимент: вместо аккумулятора к устройству была подсоединена батарея из 10 электролитических конденсаторов общей емкостью 20.5 мФ. Конденсаторы были подключены к источнику питания и заряжены до напряжения 4.2 В. Далее был запущен мониторинг с периодом измерения температуры и влажности $T_H = 10\text{ с}$, после чего соединение Bluetooth было разорвано. Затем источник питания был отключен, и работоспособность устройства с этого момента поддерживалась за счет энергии, запасенной в конденсаторах. Изменение напряжения $U_C(T)$ на конденсаторах в процессе их разрядки фиксировалось цифровым осциллографом. Полученная осциллограмма приведена на рис. 5.

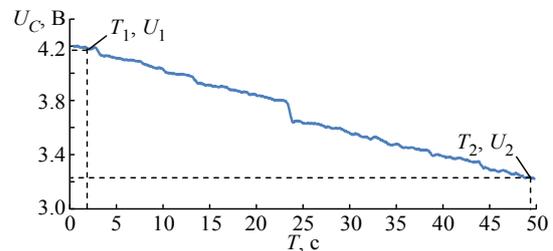


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на батарее конденсаторов
Fig. 5. Voltage waveform on the capacitor bank

Эксперимент продолжался до тех пор, пока напряжение U_C не уменьшилось приблизительно до 3.2 В. Связь между током, протекающим через конденсатор, и напряжением на нем описывается следующей формулой:

$$I_C(T) = C \frac{dU_C(T)}{dT}.$$

Проинтегрируем обе части этого равенства по времени на некотором отрезке $[T_1, T_2]$ и разделим на $T_2 - T_1$. В результате получим

$$\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} I_C(T) dT = C \frac{U_C(T_2) - U_C(T_1)}{T_2 - T_1}.$$

Левая часть данной формулы представляет собой среднее значение тока I_C через конденсатор на отрезке времени T_1 – T_2 . В данном случае ток, протекающий через конденсатор, равен по значению току, потребляемому устройством, и противоположен ему по знаку. Токами утечки можно пренебречь, поскольку они много меньше значения I_{cp} . Окончательное выражение для среднего потребляемого тока можно записать следующим образом:

$$I_{cp} = C \frac{U_1 - U_2}{T_2 - T_1},$$

где $U_1 = U_C(T_1)$ и $U_2 = U_C(T_2)$. Выберем точки (T_1, U_1) и (T_2, U_2) , как показано на рис. 5: $T_1 = 2$ с, $U_1 = 4.18$ В, $T_2 = 49.5$ с, $U_2 = 3.23$ В. Выполнив вычисления, получим:

$$I_{cp} = 410 \text{ мкА.}$$

Наконец, учитывая, что в устройстве применен аккумулятор номинальной емкостью $900 \text{ мА} \cdot \text{ч}$, оценим предполагаемое время автономной работы:

$$T_{раб} = 2195 \text{ ч} = 91.4 \text{ сут.}$$

Следует отметить, что реальное время работы устройства будет существенно меньше полученного значения. Продолжительность эксперимента составляла 50 с, и количество созданных за это время записей в журнале было недостаточным для перемещения информации из промежуточного буфера в оперативной памяти микроконтроллера на карту MicroSD (запись на карту осуществляется блоками по 128 записей). Из-за этого операции записи на карту не производились, и энергия, расходуемая на эти операции, не была учтена.

Для оценки времени работы с учетом потребления карты памяти примем следующие допущения: для записи каждого блока данных питание карты памяти включается на время $T_k = 3$ с

(с учетом времени на инициализацию карты и прочих задержек), и в течение всего этого времени карта потребляет ток $I_k = 200$ мА (максимально допустимый ток согласно информации производителя). Тогда верхнюю оценку среднего тока, потребляемого картой, можно вычислить следующим образом:

$$I_{cp.k} = I_k T_k / (128 T_H) = 469 \text{ мкА.}$$

Минимальное время автономной работы регистратора с учетом потребления карты памяти

$$T_{раб} = 1024 \text{ ч} = 42.7 \text{ сут.}$$

Заключение. В ходе данной работы было разработано устройство, предназначенное для контроля температуры, относительной влажности воздуха и ударных нагрузок в процессе транспортировки специализированных грузов, к которым предъявляются особые требования относительно упомянутых параметров.

Для управления разработанным устройством используется беспроводной интерфейс BLE, что облегчает его применение в тех случаях, когда оно расположено внутри упаковки груза. В конструкции и алгоритме работы устройства предусмотрена защита от фальсификации регистрируемых данных, в том числе присутствует датчик вскрытия корпуса. Указанные особенности в совокупности обеспечивают преимущество разработанного устройства по сравнению с существующими аналогами.

Экспериментальные испытания устройства мониторинга показали, что оно выполняет все заявленные функции. Ожидаемое время автономной работы устройства в режиме мониторинга составляет по экспериментальным данным более 40 сут, что в большинстве случаев достаточно для его использования по прямому назначению.

Список литературы

1. Влияние кратковременных отклонений температуры при транспортировке на качество лекарственных средств / Т. А. Солдатенкова, А. Б. Войтенко, Я. В. Денисова, В. Ф. Сопин // Контроль качества продукции. 2024. № 6. С. 44–49.
2. Analysis of air cargo temperature variations during transport operations / W. Pelletier, K. V. Chau, R. A. Bucklin, J. K. Brecht, D. W. Hahn, J.-P. Emond // Transactions of the ASABE. Vol. 61, № 2. P. 723–732. doi: 10.13031/trans.12524.
3. Бурин И. А. Мониторинговые системы и их влияние на осуществление перевозок // Системный анализ и логистика. 2019. № 1. С. 39–45.

4. Регистратор условий хранения и транспортировки специализированных грузов / Д. А. Киба, Н. Н. Любушкина, А. С. Гудим, А. А. Биткина // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 668–674. doi: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-668-674.
5. An IoT-based cargo monitoring system for enhancing operational effectiveness under a cold chain environment / Y. P. Tsang, K. L. Choy, C. H. Wu, G. T. S. Ho, H. Y. Lam, P. S. Koo // Intern. J. of Engin. Business Management. 2017. Vol. 9. doi: 10.1177/1847979017749063.
6. Кострин Д. К., Лисенков А. А., Ухов А. А. Электронные средства контроля технологических процессов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.

7. Анализ применимости Bluetooth Low Energy маяков для построения систем автономной навигации в закрытых помещениях / А. В. Астафьев, А. А. Демидов, У. А. Демидова, В. А. Макулов // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2019. № 2. С. 3–12.

8. Carles G., Oller J., Paradells J. Overview and evaluation of Bluetooth Low Energy: An emerging low-power wireless technology // Sensors. 2012. Vol. 12, № 9. P. 11734–11753. doi: 10.3390/s120911734.

9. Machine learning on difference image analysis: A comparison of methods for transient detection / B. Sanchez, R. M. J. Dominguez, M. Lares, J. B. Cabral, S. Gurovich, C. Colazo, M. Schneiter, C. Girardini, M. Tornatore, D. Garcia Lambas, M. Beroiz, M. C. Diaz, C. Quiñones, R. Artola, J. L. Nilo Castellon // Astronomy and Comp. 2019. Vol. 28. P. 100284. doi: 10.1016/j.ascom.2019.05.002.

10. Алгоритм обработки и анализа данных о положении, движениях и наклонах головы человека / А. С. Данилова, Н. А. Горелова, З. Д. Сергеева, Т. В. Сергеев, О. В. Тихоненкова, А. З. Яфаров // Датчики и системы. 2022. № 5. С. 66–72. doi: 10.25728/datsys.2022.5.13.

11. Способ реализации беспроводного резистивного датчика контроля температуры / А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов, В. А. Симон // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 2. С. 47–53. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-47-53.

12. Аверьянихин А. Е., Фадеев М. А., Олисевиц Е. А. Обзор возможностей операционной системы реального времени FreeRTOS, применяемой в микроконтроллерах // Технологии инженерных и информационных систем. 2020. № 4. С. 56–63.

13. Ramegowda D., Lin M. Energy efficient mixed task handling on real-time embedded systems using FreeRTOS // J. of Systems Architecture. 2022. Vol. 131. P. 102708. doi: 10.1016/j.sysarc.2022.102708.

14. Web services invocation over bluetooth / V. Auletta, C. Blundo, E. De Cristofaro, G. Raimato // Wireless Sensor Network. 2010. Vol. 2, № 6. P. 447–461. doi: 10.4236/wsn.2010.26056.

15. Метод оценки энергопотребления автономных электронных устройств и его аппаратная реализация / Л. М. Селиванов, В. А. Герасимов, А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Симон // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 5. С. 10–15.

Информация об авторах

Ухов Андрей Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: aauhov@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3744-0777>

Кострин Дмитрий Константинович – д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dkkostrin@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Герасимов Владимир Александрович – ассистент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vl.gerasimov@mail.ru

Селиванов Лев Михайлович – ассистент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: lmselivanov@gmail.com

Симон Всеволод Алексеевич – канд. техн. наук, ассистент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vsev.simon@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-3958-6339>

Вклад авторов:

Ухов А. А. – постановка задачи, общее руководство, выводы.

Кострин Д. К. – обзор литературы, подготовка текста статьи, выводы.

Герасимов В. А. – разработка электронного устройства, проведение экспериментов.

Селиванов Л. М. – разработка программного обеспечения, проведение экспериментов.

Симон В. А. – обзор литературы, проведение экспериментов.

References

1. Vlijanie kratkovremennykh odklonenij temperatury pri transportirovke na kachestvo lekarstvennykh sredstv / Т. А. Soldatenkova, А. В. Vojtenko, Ja. V. Denisova,

V. F. Sopin // Kontrol' kachestva produkcii. 2024. № 6. S. 44–49. (In Russ).

2. Analysis of air cargo temperature variations during transport operations / W. Pelletier, K. V. Chau, R. A. Bucklin, J. K. Brecht, D. W. Hahn, J.-P. Emond // Transactions of the ASABE. Vol. 61, № 2. P. 723–732. doi: 10.13031/trans.12524.
3. Burin I. A. Monitoringovye sistemy i ih vliyanie na osushhestvlenie perevozok // Sistemnyj analiz i logistika. 2019. № 1. S. 39–45. (In Russ.)
4. Registrator uslovij hranenija i transportirovki specializirovannyh gruzov / D. A. Kiba, N. N. Ljubushkina, A. S. Gudim, A. A. Bitkina // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2019. T. 62, № 7. S. 668–674. doi: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-668-674. (In Russ.)
5. An IoT-based cargo monitoring system for enhancing operational effectiveness under a cold chain environment / Y. P. Tsang, K. L. Choy, C. H. Wu, G. T. S. Ho, H. Y. Lam, P. S. Koo // Intern. J. of Engin. Business Management. 2017. Vol. 9. doi: 10.1177/1847979017749063.
6. Kostrin D. K., Lisenkov A. A., Uhov A. A. Jelektronnye sredstva kontrolja tehnologicheskikh processov. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2016. 228 s. (In Russ)
7. Analiz primenimosti Bluetooth Low Energy majakov dlja postroenija sistem avtonomnoj navigacii v zakrytyh pomeshhenijah / A. V. Astafev, A. A. Demidov, U. A. Demidova, V. A. Makulov // Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannyh. 2019. № 2. S. 3–12. (In Russ.)
8. Carles G., Oller J., Paradells J. Overview and evaluation of Bluetooth Low Energy: An emerging low-power wireless technology // Sensors. 2012. Vol. 12, № 9. P. 11734–11753. doi: 10.3390/s120911734.
9. Machine learning on difference image analysis: A comparison of methods for transient detection / B. Sanchez, R. M. J. Dominguez, M. Lares, J. B. Cabral, S. Gurovich, C. Colazo, M. Schneiter, C. Girardini, M. Tornatore, D. Garcia Lambas, M. Beroiz, M. C. Diaz, C. Quinones, R. Artola, J. L. Nilo Castellon // Astronomy and Comp. 2019. Vol. 28. P. 100284. doi: 10.1016/j.ascom.2019.05.002.
10. Algoritm obrabotki i analiza dannyh o polozhenii, dvizhenijah i naklonah golovy cheloveka / A. S. Danilova, N. A. Gorelova, Z. D. Sergeeva, T. V. Sergeev, O. V. Tihonenkova, A. Z. Jafarov // Datchiki i sistemy. 2022. № 5. S. 66–72. doi: 10.25728/datsys.2022.5.13. (In Russ.)
11. Sposob realizacii besprovodnogo rezistivnogo datchika kontrolja temperatury / A. A. Uhov, D. K. Kostrin, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, V. A. Simon // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2024. T. 17, № 2. S. 47–53. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-47-53. (In Russ.)
12. Aver'janihin A. E., Fadeev M. A., Olisevich E. A. Obzor vozmozhnostej operacionnoj sistemy real'nogo vremeni FreeRTOS, primenjaemoj v mikrokontrollerah // Tehnologii inzhenernyh i informacionnyh sistem. 2020. № 4. S. 56–63.
13. Ramegowda D., Lin M. Energy efficient mixed task handling on real-time embedded systems using FreeRTOS // J. of Systems Architecture. 2022. Vol. 131. P. 102708. doi: 10.1016/j.sysarc.2022.102708. (In Russ.)
14. Web services invocation over bluetooth / V. Auletta, C. Blundo, E. De Cristofaro, G. Raimato // Wireless Sensor Network. 2010. Vol. 2, № 6. P. 447–461. doi: 10.4236/wsn.2010.26056.
15. Metod ocenki jenergopotreblenija avtonomnyh jelektronnyh ustrojstv i ego apparatnaja realizacija / L. M. Selivanov, V. A. Gerasimov, A. A. Uhov, D. K. Kostrin, V. A. Simon // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2020. № 5. S. 10–15. (In Russ.)

Information about the authors

Andrey A. Uhov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: aauhov@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3744-0777>

Dmitry K. Kostrin – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: dkkostrin@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Vladimir A. Gerasimov – Assistant of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vl.gerasimov@mail.ru

Lev M. Selivanov – Assistant of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: lmselivanov@gmail.com

Vsevolod A. Simon – Cand. Sci. (Eng), Assistant of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vsev.simon@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-3958-6339>

Author contribution statement:

Uhov A. A. – problem statement, general guidance, conclusions.

Kostrin D. K. – literature review, preparation of the article text, conclusions.

Gerasimov V. A. – development of an electronic device, conducting experiments.

Selivanov L. M. – software development, conducting experiments.

Simon V. A. – literature review, conducting experiments.

Статья поступила в редакцию 10.12.2024; принята к публикации после рецензирования 22.01.2025; опубликована онлайн 28.03.2025.

Submitted 10.12.2024; accepted 22.01.2025; published online 28.03.2025.
