

Система обнаружения лесных пожаров с использованием оптимизированных беспроводных сенсорных сетей Zigbee на солнечных батареях

А.Э. Беляев^a, Е.А. Будевич^b, Н.Р. Вычерова^c

Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, 13, Ухта, Республика Коми, Россия

^a abelyaev@ugtu.net, ^b nshol@ugtu.net, ^c nvycherova@ugtu.net

^a <https://orcid.org/0000-0002-3936-0076>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1072-7687>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-9631-4300>

Статья поступила 27.09.2021, принята 22.10.2021

Лесные пожары являются одним из наиболее распространенных существенных видов стихийных бедствий, способных оказать значительное воздействие на окружающую среду, в связи с чем наиболее важной задачей является их раннее обнаружение. Основная потребность в выборе средств обнаружения лесных пожаров заключается в преодолении недостатков, присутствующих в существующих технологиях MODIS и базовых беспроводных сенсорных сетевых системах обнаружения лесных пожаров, усовершенствование системы обнаружения лесных пожаров. Предлагаемая система состоит из двух основных модулей — зоны мониторинга и лесной зоны, которые делятся на пять подмодулей для пошаговой разработки и внедрения. К ним относятся модуль датчиков, модуль последовательной связи с использованием Zigbee, оптимизированный аккумулятор солнечной энергии с применением отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ, англ. MPPT — Maximum Power Point tracking), веб-сервера на базе ПК и механического моделирования. Первые три подмодуля объединены и относятся к модулю лесной зоны. Механическое моделирование выполняется для модуля лесной зоны, в то время как веб-сервер на базе ПК разработан для зоны мониторинга. Результаты разработок показывают, что различные датчики, используемые в дополнение к датчику температуры, повышают уровень безопасности для околосредных зон. Оптимизированный аккумулятор солнечной энергии повышает эффективность примерно до 85 %, а использование веб-сервера на базе ПК снижает громоздкость и стоимость всей системы.

Ключевые слова: лесные пожары; Zigbee; MODIS; ОТММ; датчик; микроконтроллер; автоматическая система; источник постоянного тока; схема Дарлингтона; инвертирующий усилитель; оптимизированный аккумулятор солнечной энергии; механическое моделирование; последовательная связь; сервер; беспроводная сенсорная сеть.

Forest fire detection system using optimized Zigbee wireless sensor networks powered by solar panels

A.E. Belyaev^a, E.A. Budevich^b, N.R. Vycherova^c

Ukhta State Technical University; 13, Pervomayskaya St., Ukhta, Republic of Komi, Russia

^a abelyaev@ugtu.net, ^b nshol@ugtu.net, ^c nvycherova@ugtu.net

^a <https://orcid.org/0000-0002-3936-0076>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1072-7687>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-9631-4300>

Received 27.09.2021, accepted 22.10.2021

Forest fires is one of the most widespread significant types of natural disasters that can have a significant impact on the environment, and, therefore, their early detection is the most important task. The main need for the choice of forest fire detection tools is to overcome the shortcomings present in existing MODIS technologies and basic wireless sensor network systems for detecting forest fires, to improve the forest fire detection system. The proposed system consists of two main modules: the monitoring zone and the forest zone, which are divided into five submodules for step-by-step development and implementation. These include a sensor module, a serial communication module using Zigbee, an optimized solar energy battery with the use of maximum power point tracking (MPPT), a PC-based web server and mechanical modeling. The first three sub-modules are combined and belong to the forest zone module. Mechanical modeling is used for the forest zone module, while a PC-based web server is designed for the monitoring zone. The results of the developments show that various sensors used in addition to the temperature sensor increase the level of safety for near forest areas. An optimized solar energy battery increases efficiency to about 85%, and the use of a PC-based web server reduces the bulkiness and cost of the entire system.

Keywords: forest fires; Zigbee; MODIS; MPPT; sensor; microcontroller; automatic system; DC source; Darlington circuit; inverting amplifier; optimized solar energy storage; mechanical modeling; serial communication; server; wireless sensor network.

Введение. Леса являются частью важных и незаменимых ресурсов для выживания и социального развития человека, которые защищают экологию Земли. Однако при некоторых неконтролируемых антропогенных и природных воздействиях часто возникают лесные пожары, одно из самых серьезных бедствий для лесных

ресурсов и окружающей среды. В последние годы частота лесных пожаров значительно возросла из-за изменений климата, деятельности человека и других факторов. Предотвращение и мониторинг лесных пожаров стало глобальной проблемой в организациях по предотвращению лесных пожаров. Методы предотвращения лесных пожаров в основном представлены патрулированием, наблюдением со сторожевых вышек, спутниковым мониторингом [1] и, в последнее время, мониторингом беспроводных сенсорных сетей. Хотя наблюдение со сторожевых вышек легко выполнимо, оно имеет несколько недостатков. Во-первых, данный метод требует значительных финансовых и материальных ресурсов, а также квалифицированной рабочей силы. Во-вторых, существует много проблем с персоналом противопожарной защиты, таких как невнимательность, отсутствие на посту, невозможность мониторинга в реальном времени и ограниченная зона охвата [2].

Сфера применения спутниковых систем обнаружения также ограничена рядом факторов, что снижает их эффективность при обнаружении лесных пожаров. Из-за недостатков спутниковых систем обнаружения используется технология беспроводных сенсорных сетей для обнаружения лесных пожаров и отправки информации на компьютеры в центрах мониторинга. Собранные данные анализируются и обрабатываются компьютером. По сравнению с обычной метеорологической информацией и основными данными о лесных ресурсах система может быстро оценить потенциальную пожар-

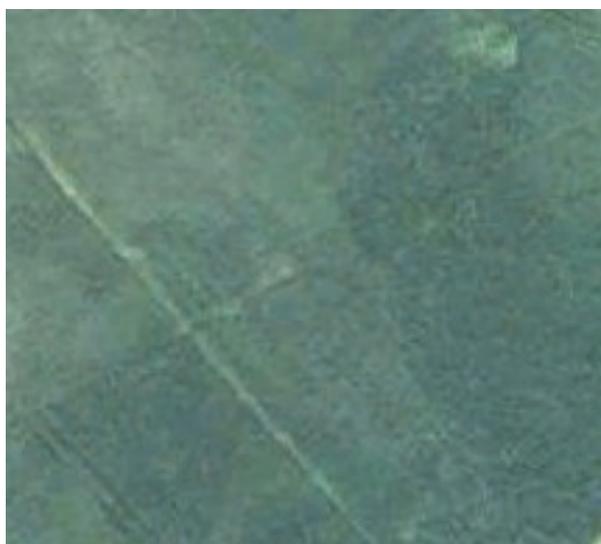
ную опасность. Затем результаты анализов отправляются в соответствующий отдел в качестве основы для выработки политики, с помощью которой принимаются решения по пожаротушению или предотвращению пожаров [3].

Спутниковые системы обнаружения пожаров. Одна из самых популярных спутниковых систем обнаружения пожара основана на MODIS [3].

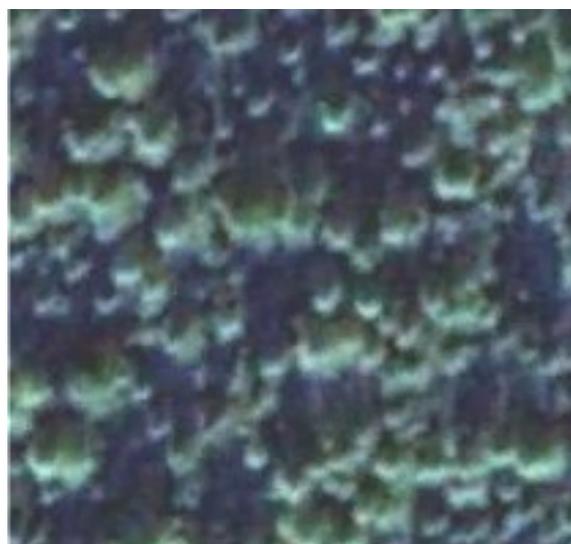
Спектродиаметр для получения изображений с умеренным разрешением был отправлен в космос для съемки поверхности Земли и обнаружения лесных пожаров. Проблемы, связанные с этой системой, заключаются в том, что она имеет длинный цикл сканирования [2], т. е. для охвата всей поверхности Земли требуется максимум два полных дня, прежде чем отправлять ее на земную станцию для анализа обнаружения лесных пожаров. Анализ занимает так много времени согласно уравнению (1):

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Время съёмки} = & & & & & & + \\ & + & & & + & & \\ & & + & & & + & \\ & & & & & & \text{ния} \end{array} \quad (1)$$

Получаемые изображения отличаются достаточно низким разрешением, как показано на рис. 1. Даже если обработанное изображение увеличить для обнаружения небольших участков лесного пожара, их невозможно определить из-за низкого разрешения изображения.



а) оригинальное изображение



б) увеличенное изображение с низким разрешением

Рис. 1. Изображения, показывающие характеристику низкого разрешения

Другая проблема состоит в том, что слои облаков могут маскировать зону мониторинга в течение всего периода сканирования, и очень трудно при этом достичь математического количественного определения параметров пожара в реальном времени (рис. 2). Слои облаков могут маскировать лесные пожары, делая их

недоступными для спутниковых систем обнаружения пожара из космоса [5]. Данный недостаток в спутниковых системах обнаружения лесных пожаров оказывается достаточно серьезным, поскольку преодолеть его в настоящее время не представляется возможным.

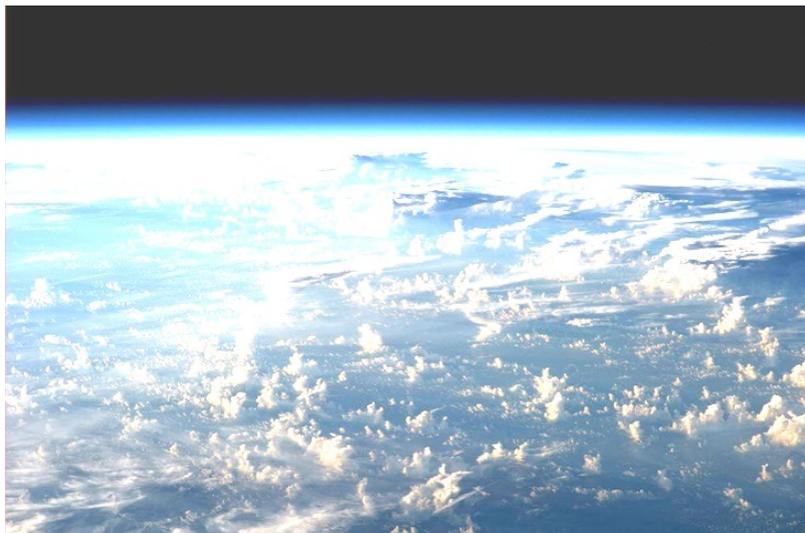


Рис. 2. Облака препятствуют обнаружению лесных пожаров из космоса

Основные беспроводные датчики сетевой системы обнаружения лесных пожаров. Беспроводные сенсорные сетевые системы обнаружения лесных пожаров, которые были первоначально внедрены в спутниковые системы обнаружения пожаров, состояли из радиочастотных модулей и обычной системы аккумуляции солнечной энергии [6]. Основным радиочастотным модулем, который использовался для беспроводной связи, основан на чипе CC2430, имеющем определенные недостатки. Также для беспроводной связи использовались другие модули, такие как EZ430-RF2500. Когда расстояние между двумя радиочастотными модулями увеличивается, потери мощности увеличиваются экспоненциально, поэтому невозможно разнести оба модуля, чтобы покрыть большую площадь с низкими потерями мощности. Кроме того, потребление модулем

тока во время операции приема (19,4 мА) и во время операции передачи (23 мА) является довольно высоким и неэффективным [7]. На рис. 3 показана основная беспроводная сенсорная сеть на основе системы обнаружения лесных пожаров.

Беспроводная сенсорная сеть, объединяющая компьютерные и коммуникационные технологии с технологией сенсорной сети, считается одной из появляющихся технологий, которые существенно повлияют на будущее развитие человечества [8]. Данная сеть состоит из многочисленных повсеместных узлов микродатчиков, которые могут совместно отслеживать и собирать информацию о различных средах и различных объектах мониторинга. В качестве радиочастотного модуля для беспроводной связи используется модуль SimpliciTI EZ430-RF2500.

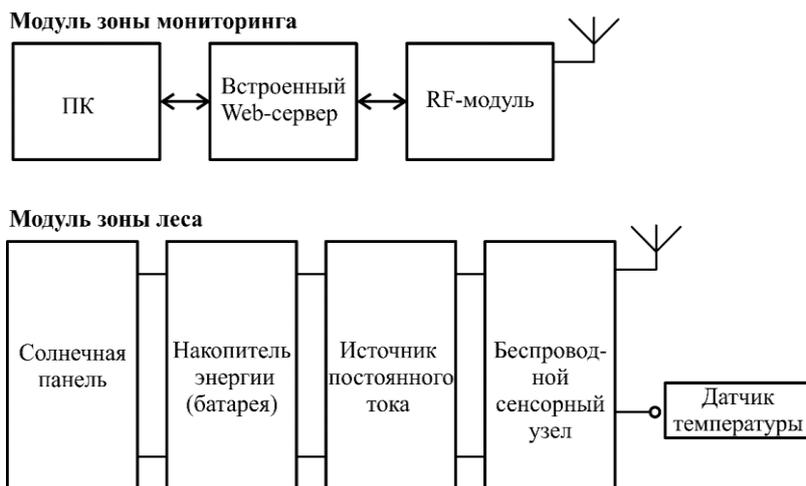


Рис. 3. Основная беспроводная сенсорная сетевая система обнаружения лесных пожаров

Сенсорный узел является основным блоком и платформой беспроводной сенсорной сети. Сенсорный узел обычно состоит из модуля датчика, модуля обработки,

модуля беспроводной связи и модуля питания. На рис. 4 показана структурная схема сенсорного узла.

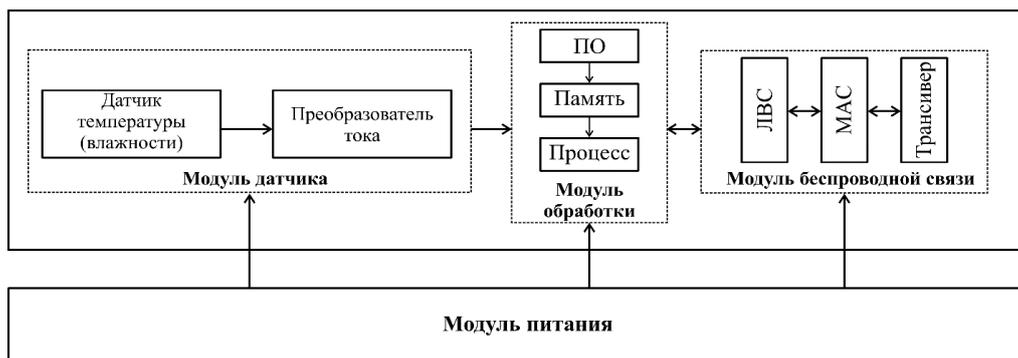


Рис. 4. Структурная схема сенсорного узла

Модуль датчика отвечает за аналого-цифровое преобразование данных и сбор параметров, таких как относительная влажность атмосферы и температура воздуха. Модуль обработки отвечает за управление работой всего узла датчика, сохранение и копирование данных, собранных его собственным узлом, и двоичной информации, передаваемой из других узлов. Модуль беспроводной связи отвечает за связь с другими узлами и обмен управляющей информацией, а также прием или передачу данных. Модуль питания обеспечивает питание для трех других модулей и управляет узлами, что делает его ключевым фактором для эффективной работы сети.

График зависимости потерь мощности передачи от увеличения расстояния между передатчиком и приемником приведен на рис. 5.

Максимальное расстояние, на которое передается большинство пакетов данных, составляет около 30 м [3]. Также на максимальное расстояние передачи может влиять ориентация антенн как передатчика, так и

приемника. График на рис. 6 показывает увеличение вероятности ошибки на пакет SimpliсTI из-за увеличения расстояния между передатчиком и приемником.

Предлагаемая система преодолевает все недостатки спутниковых систем обнаружения лесных пожаров и базовых беспроводных сенсорных сетевых систем обнаружения лесных пожаров.

В предлагаемой системе используются три датчика — температуры (дыма), давления и дождя. Датчик измерения концентрации дыма выполнен в виде канала с оптической связью с камерой, в которую попадает дым от пожара. Основная потребность в датчике давления заключается в обнаружении аномального изменения давления в лесных районах, которое может быть вызвано каким-либо воздействием или просто каким-то диким животным. Датчик дождя используется для предупреждения людей возле лесных массивов о возможности возникновения наводнений и оползней вследствие выпадения обильных осадков.

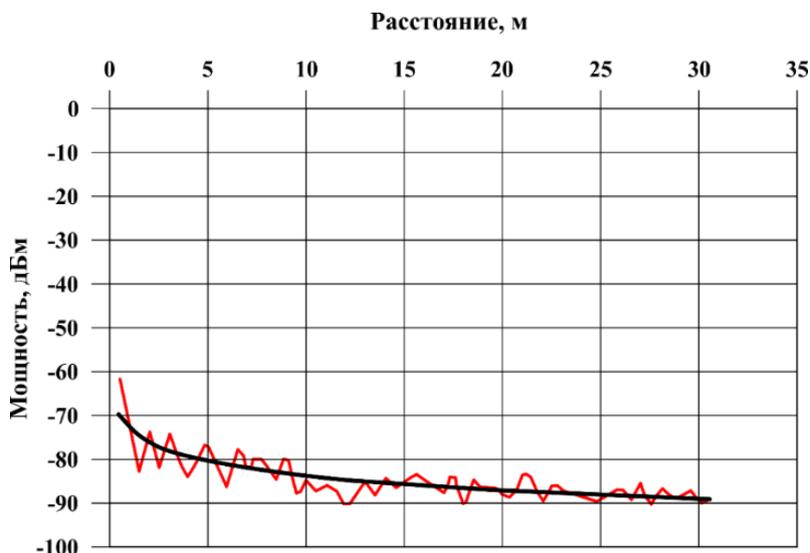


Рис. 5. График зависимости потерь мощности передачи с сети SimpliсTI от увеличения расстояния между передатчиком и приемником

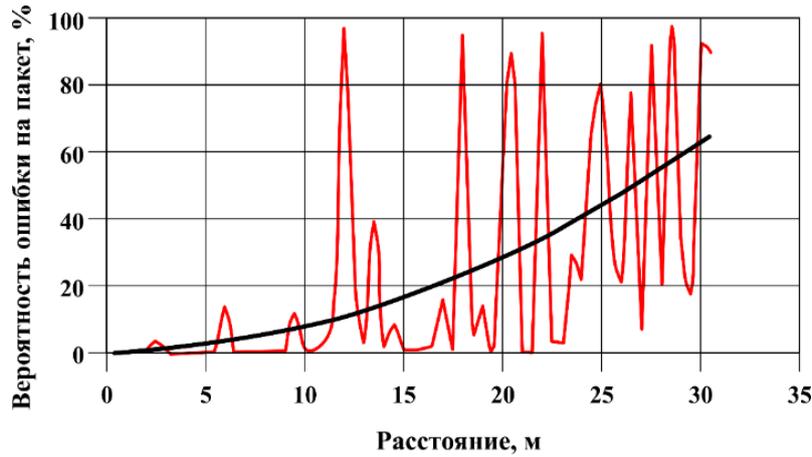


Рис. 6. График зависимости вероятности ошибки на пакет SimpliciiTI от расстояния между передатчиком и приемником

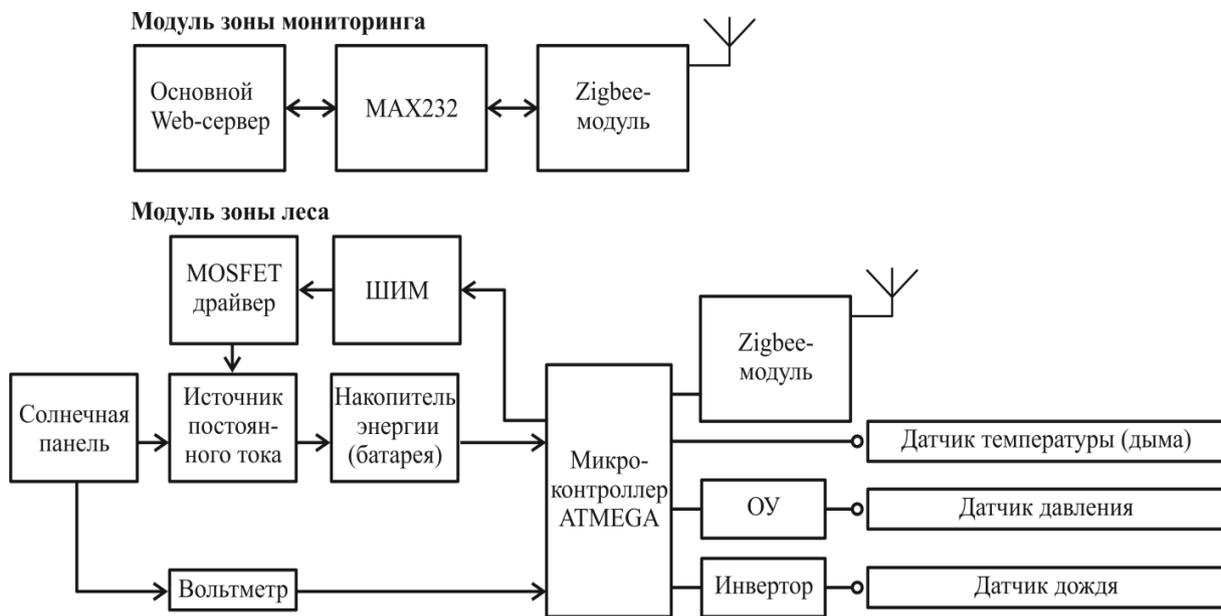


Рис. 7. Схема предлагаемой системы

Сигнал, регистрируемый датчиком давления, создает выходной, который не может быть воспринят другими цепями, поскольку имеет очень низкое значение. Чтобы получить конечное, точное и стабильное усиление, необходимо спроектировать соответствующий измерительный усилитель. При этом резисторы выбираются с почти одинаковыми или ближайшими номиналами. Выходное состояние измерительного усилителя является основным дифференциальным усилителем. Выход основного дифференциального усилителя задается следующим уравнением:

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_2}{R_1} U_1 - \dots \quad (2)$$

где $\frac{R_2}{R_1}$ — коэффициент передачи; U_1, U_2 — входные сигналы.

Окончательный выход инструментального усилителя задается следующим уравнением:

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} \left(\dots \right) \quad (3)$$

В соответствии с конструкцией выбираются значения сопротивлений. Увеличиваем сигнал в 204 раза, чтобы он легко интерпретировался внешними цепями.

Расчетная схема измерительного усилителя, за которой следует инвертирующий усилитель по отношению к расчетным уравнениям, показана на рис. 8.

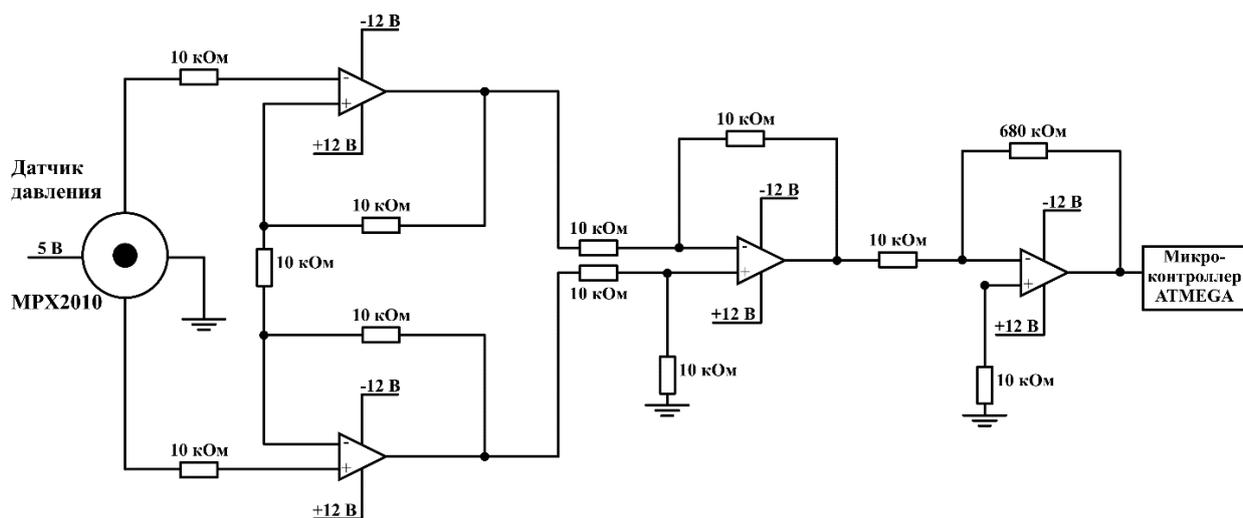


Рис. 8. Измерительный и инвертирующий усилители

На рис. 9 показан график зависимости выходного напряжения термистора от температуры. Выходное напряжение пропорционально температуре, и график показывает нормальную работу термистора. Аналогично, на рис. 10 показан график зависимости давления от выходного напряжения инвертирующего усилителя. Из графика видно, что при увеличении давления пьезоэлектрический кристалл создает большее напряжение из-за увеличения механического напряжения. Инструментальный усилитель и инвертирующий усилитель дают усиленный выходной сигнал датчика давления. График показывает нормальную работу датчика давления, поскольку давление пропорционально выходному напряжению, генерируемому датчиком давления.

Обычные солнечные накопители не используют энергию, генерируемую при слабом солнечном свете, тем самым снижается их эффективность. Поверхность солнечных панелей может быть заблокирована

листьями или другими объектами, что также снижает их эффективность. Предлагается методология оптимизации солнечного накопителя с отслеживанием точки максимальной мощности (ОТММ) для узлов беспроводной сенсорной сети.

Разработка систем с постоянным питанием, не требующим замены (перезарядки) батарей, является одной из конечных целей проектирования сенсорных сетей. Методы ОТММ очень распространены в сфере крупномасштабного применения солнечных элементов. Дополнительная энергия, потребляемая трекером ОТММ, легко компенсируется гораздо большим количеством энергии, которую можно получить из окружающей среды.

Оптимальным является применение метода возмущения и наблюдения, который прост в реализации, требует меньше времени на обработку и используется для многих систем [2; 3].

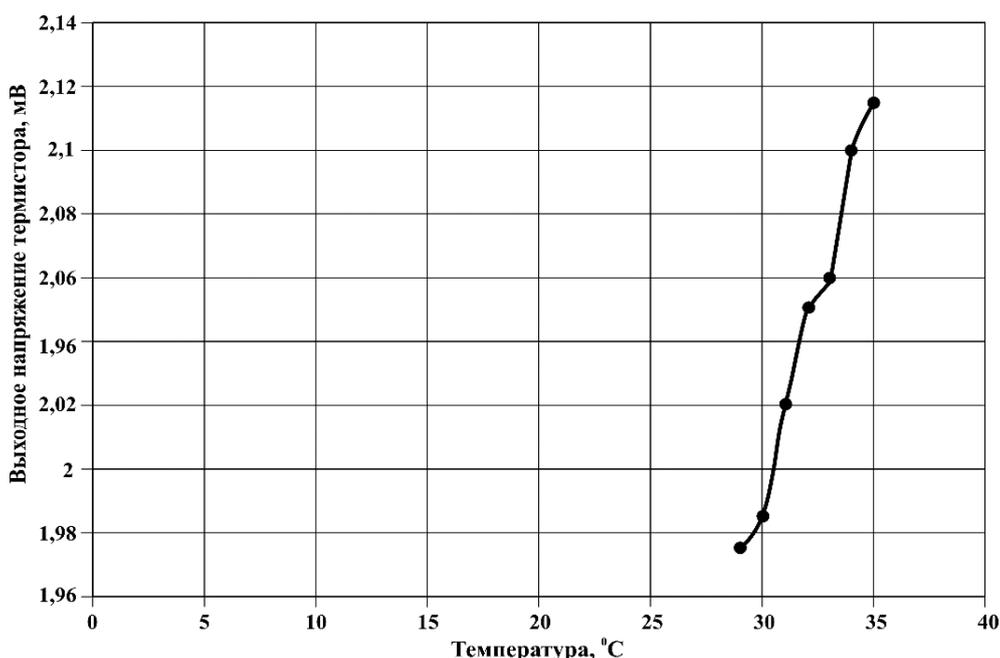


Рис. 9. График зависимости температуры от выходного напряжения термистора

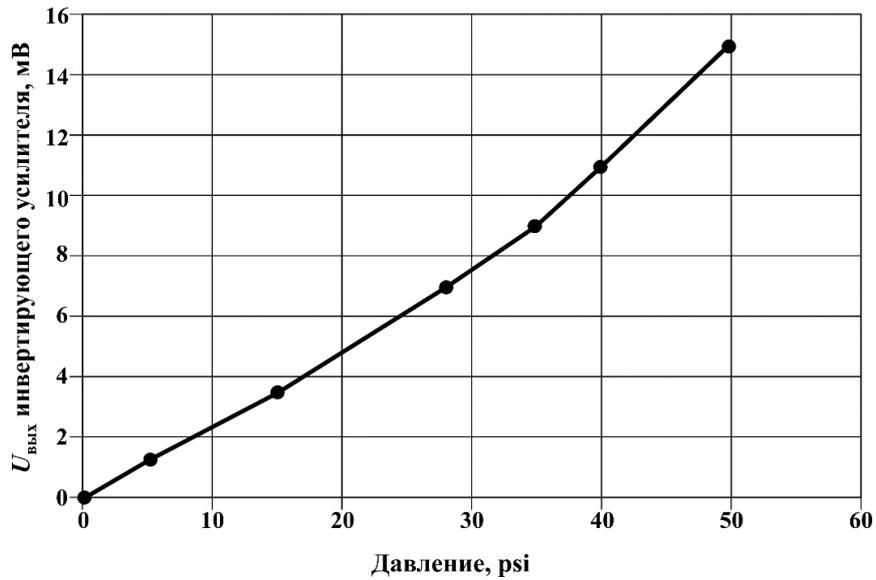


Рис. 10. График зависимости давления от выходного напряжения от инвертирующего усилителя

Работа метода возмущения и наблюдения объясняется с помощью блок-схемы на рис. 11. Работу алгоритма возмущения и наблюдения необходимо для выполнения отслеживания максимальной мощности для оптимизированной системы сбора солнечной энергии.

Схема аппаратных блоков для реализации ОТММ приведена на рис. 12. Он содержит блоки,

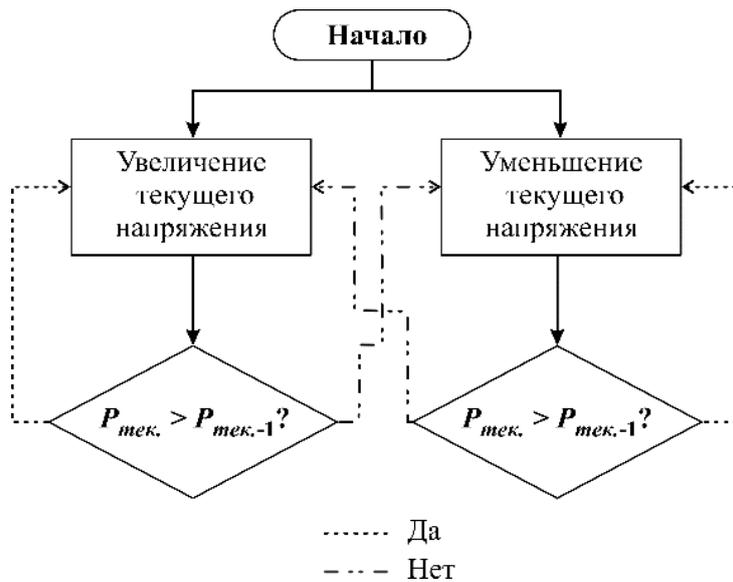


Рис. 11. Блок-схема для работы алгоритма возмущения и наблюдения

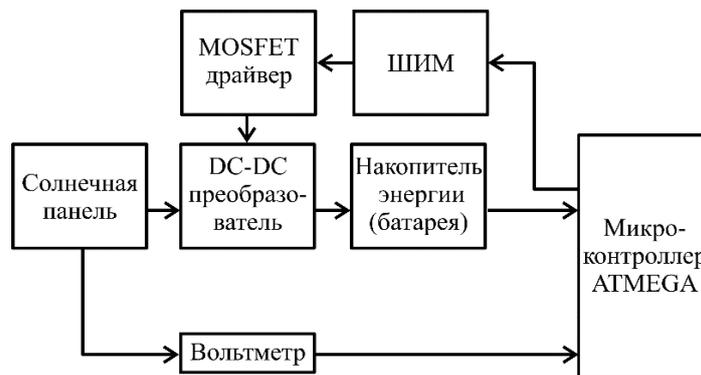


Рис. 12. Аппаратные блоки для ОТММ

Используется монокристаллическая солнечная панель, поскольку она не имеет внутренних потерь, в отличие от поликристаллических солнечных элементов. Для блоков «MOSFET драйвер» и «DC-DC преобразователь» используются MOSFET и схема Дарлингтона. Также используются индуктор для зарядки и разрядки во время преобразования, выпрямитель для преобразования переменного тока в постоянный и,

наконец, потенциометры для управления входным и выходным напряжением. ШИМ и измерение напряжения выполняются микроконтроллером. Метод возмущения и наблюдения прописан в микроконтроллере на языке C. Схема Дарлингтона для переключения приведена на рис. 13, а повышающий DC-DC преобразователь показан на рис. 14.

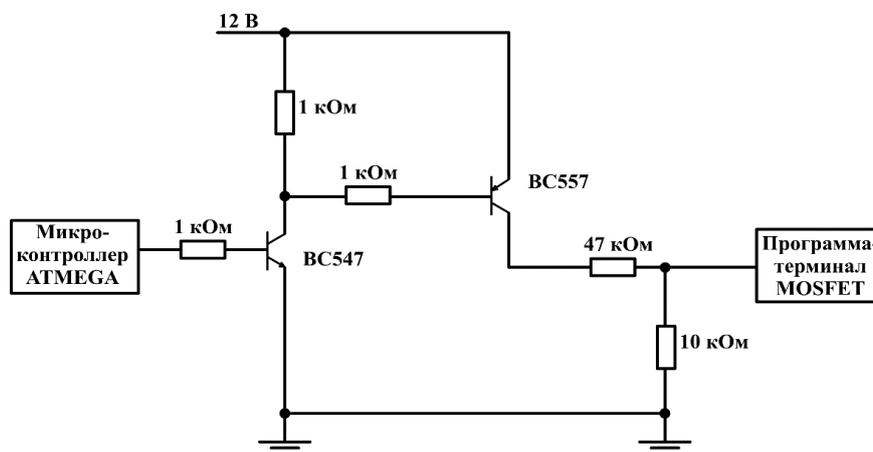


Рис. 13. Схема Дарлингтона

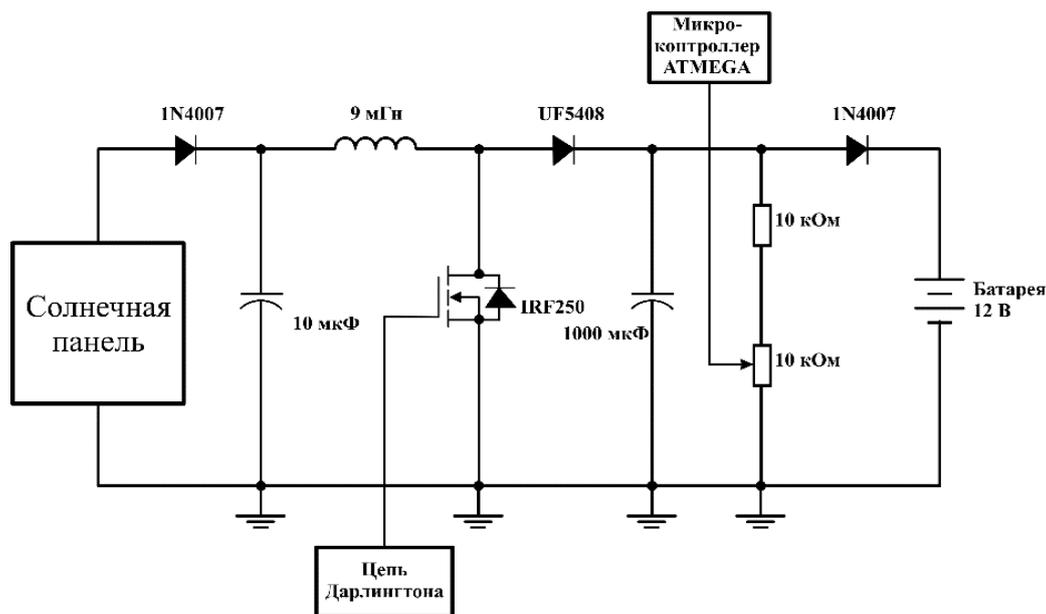


Рис. 14. Повышающий преобразователь постоянного тока

Схема (пара) Дарлингтона — это два транзистора, которые действуют как один, но с гораздо более высоким коэффициентом усиления по току. Количество входного тока, доступного для включения транзистора, очень мало. Это может означать, что один транзистор не сможет пропустить достаточный ток, необходимый для нагрузки. Поэтому, когда используется пара Дарлингтона, она дает значительно увеличенный коэффициент усиления по сравнению с одним транзистором. Это позволит очень низкому входному току переключать намного больший ток нагрузки, что важно для включения накопителя солнечной энергии.

Повышающий преобразователь постоянного тока представляет собой преобразователь питания с выходным напряжением, превышающим его входное напряжение. Это класс импульсных источников питания, содержащий, по меньшей мере, два полупроводниковых переключателя и один элемент накопления энергии. Повышающий преобразователь называют так, потому что он «увеличивает» напряжение источника. Поскольку мощность должна быть сохранена, выходной ток ниже, чем ток источника. В нашем случае оно повышает низкое напряжение, генерируемое солнечной панелью, до высокого напряжения, чтобы эффективно заряжать

аккумулятор и использовать собранную энергию. Преобразователь DC-DC сконструирован таким образом, что его выход получается в соответствии со следующим уравнением:

$$U_0 = \frac{P}{K(1 - \frac{L}{\dots})} \quad (4)$$

Сигнал для IRF250 для целей переключения берется из схемы Дарлингтона. Требуемое напряжение может быть назначено повышающему преобразователю для повышения напряжения до этого значения. Метод ОТММ в микроконтроллере отслеживает повышенное напряжение от повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный. Таким образом, с помощью метода ОТММ для отслеживания точки максимальной мощности создается оптимизированный накопитель солнечной энергии.

Литература

1. Серебренников М.Ю., Санников С.П. Возможности и перспективы использования RFID-технологии в таксационных исследованиях управления лесами // Науч. творчество молодежи - лесному комплексу России: материалы VII Всерос. науч.-технической конф. Екатеринбург: УГЛТУ, 2011. Ч. 1. С. 58-60.
2. Arun Ganesh U., Anand M., Arun S., Dinesh M., Gunaseelan P., Karthik R. Forest Fire Detection Using Optimized Solar - Powered Zigbee Wireless Sensor Networks // International Journal of Scientific & Engineering Research. V. 4, iss. 6, June-2013. P. 586-596.
3. Герц Э.Ф., Санников С.П., Соловьев В.М. Использование радиочастотных устройств для мониторинга экологической ситуации в лесах // Аграрный вестн. Урала. 2012. № 1 (93). С. 37-39.
4. Han N., Kan J., Li W., Zhang J. Forest Fire Detection System Based on a Zigbee Wireless Sensor Network, Higher Education Press; co-published with Springer-Verlag GmbH, 2008. P. 369-374.
5. Котельников Р.В., Коршунов Н.А. Космический мониторинг лесных пожаров. Система информационного поля // Авианорама. 2008. № 2. С. 14-17.
6. Коптев С.В., Скуднева О.В. О возможностях применения беспилотных летательных аппаратов в лесохозяйственной практике // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2018. № 1. С. 130-135.
7. Демехин Ф.В. Методы обнаружения пожара на основе видеотехнологий // Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15. № 2. С. 33-39.
8. Новоселова И.С. О повышении эффективности обнаружения лесных пожаров беспилотными летательными аппаратами // Науч. сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: электрон. сб. ст. по материалам XVIII студенческой междунар. науч.-практической конф. (сент. 2020 г.). Новосибирск, 2020. № 9 (92). С. 35-37.
9. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы / под общ. ред. Ю.Л. Воробьева. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. 312 с.
10. Галкин П.В., Головкина Л.В., Борисенко А.С. Исследование влияния лесных массивов на дальность связи в сетях ZigBee // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. Т. 3. № 2 (51). С. 4-9.
11. Krull W., Tobera R., Willms I., Essen H. Early forest fire detection and verification using optical smoke, gas and

Заключение. Вывод с веб-сервера на базе ПК является наиболее важным результатом всего проекта. Это очень важно для зоны мониторинга, где на передней панели соответствующим образом должна отображаться информация о датчиках и соответствующее предупреждение. Предупреждение появляется, когда температура (концентрация дыма) и давление превышают свой порог, и происходят соответствующие изменения в состоянии окружающей среды. Аналогичным образом возникает предупреждение, полученное от датчика дождя.

Таким образом, запись о возникновении отклонений в лесном массиве может быть легко выполнена и немедленно сопоставлена с зафиксированными отклонениями, что невозможно сделать с помощью встроенных автономных серверов, поскольку они должны быть подключены к ПК перед интерпретацией и сравнением.

microwave sensors // Procedia Engineering. 2012. V. 45. P. 584-594.

12. Kechar Bouabdellaha, Houache Noureddine, Sekhri Larbi. Using Wireless Sensor Networks for Reliable Forest Fires Detection // Procedia Computer Science. 2013. V. 19. P. 794-801.
13. Bayo A., Antolín D., Medrano N., Calvo B. Early Detection and Monitoring of Forest Fire with a Wireless Sensor Network System // Procedia Engineering. 2010. V. 5. P. 248-251.
14. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. Введ. 01.07 1992. М.: Изд-во стандартов, 2004. 49 с.
15. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Введ. 01.01.2000. М.: Изд-во стандартов, 2000. 71 с.
16. Мурашко Н.И., Иванов А.А., Андреев А.В. Система обработки данных аэрокосмического мониторинга // BIG DATA Advanced Analytics: collection of materials of the fourth international scientific and practical conference, Minsk, May 3-4, 2018 / BSUIR; Ed. by: M. Batura. Minsk, 2018. P. 278-282.
17. Архипов Е.В., Залесов С.В. Динамика лесных пожаров и их экологические последствия // Аграрный вестн. Урала. 2017. № 4 (158). С. 10-15.

References

1. Serebrennikov M.YU., Sannikov S.P. Opportunities and prospects for using RFID technology in taxation studies of forest management // Nauch. tvorchestvo molodezhi - lesnomu kompleksu Rossii: materialy VII Vseros. nauch.-tekhnikeskoj konf. Ekaterinburg: UGLTU, 2011. CH. 1. P. 58-60.
2. Arun Ganesh U., Anand M., Arun S., Dinesh M., Gunaseelan P., Karthik R. Forest Fire Detection Using Optimized Solar - Powered Zigbee Wireless Sensor Networks // International Journal of Scientific & Engineering Research. V. 4, iss. 6, June-2013. P. 586-596.
3. Gerc E.F., Sannikov S.P., Solov'ev V.M. The use of radio frequency devices for monitoring the ecological situation in forests // Agrarian Bulletin of the Urals. 2012. № 1 (93). P. 37-39.
4. Han N., Kan J., Li W., Zhang J. Forest Fire Detection System Based on a Zigbee Wireless Sensor Network, Higher Education Press; co-published with Springer-Verlag GmbH, 2008. P. 369-374.

5. Kotel'nikov R.V., Korshunov N.A. Space monitoring of forest fires. System information field // Aviapanorama. 2008. № 2. P. 14-17.
6. Koptev S.V., Skudneva O.V. On the Applicability of UAV in Forestry Practice // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal. 2018. № 1. P. 130-135.
7. Demekhin F.V. Methods of fire detection based on video technologies // Fire & Explosion Safety. 2006. V. 15. № 2. P. 33-39.
8. Novoselova I.S. On improving the efficiency of detection of forest fires by unmanned aerial vehicles // Nauch. soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki: elektron. sb. st. po materialam XVIII studencheskoj mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (sent. 2020 g.). Novosibirsk, 2020. № 9 (92). P. 35-37.
9. Vorob'ev YU.L., Akimov V.A., Sokolov YU.I. Forest fires in Russia: Status and problems / pod obshch. red. YU.L. Vorob'eva. M.: DEKS-PRESS, 2004. 312 p.
10. Galkin P.V., Golovkina L.V., Borisenko A.S. Investigation of the influence of woodlands on the communication range in ZigBee networks // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2011. V. 3. № 2 (51). P. 4-9.
11. Krull W., Tobera R., Willms I., Essen H. Early forest fire detection and verification using optical smoke, gas and microwave sensors // Procedia Engineering. 2012. V. 45. P. 584-594.
12. Kechar Bouabdellaha, Houache Noureddine, Sekhri Larbi. Using Wireless Sensor Networks for Reliable Forest Fires Detection // Procedia Computer Science. 2013. V. 19. P. 794-801.
13. Bayo A., Antolín D., Medrano N., Calvo B. Early Detection and Monitoring of Forest Fire with a Wireless Sensor Network System // Procedia Engineering. 2010. V. 5. P. 248-251.
14. GOST 12.1.004-91. Fire safety. General requirements. Vved. 01.07 1992. M.: Izd-vo standartov, 2004. 49 p.
15. GOST R 12.3.047-98. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. Vved. 01.01.2000. M.: Izd-vo standartov, 2000. 71 p.
16. Murashko N.I., Ivanov A.A., Andreenko A.V. System of Aerospace Monitoring Data Processing // BIG DATA Advanced Analytics: collection of materials of the fourth international scientific and practical conference, Minsk, May 3-4, 2018 / BSUIR; Ed. by: M. Batura. Minsk, 2018. P. 278-282.
17. Arhipov E.V., Zalesov S.V. The dynamics of forest fires and their ecological consequences // Agrarian Bulletin of the Urals. 2017. № 4 (158). P. 10-15.