

На правах рукописи



Акбари Саба

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПИТАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ ГАЗА

Специальность 05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Баранов Александр Михайлович

Официальные оппоненты: Фанченко Сергей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, национальный исследовательский центр Курчатовский институт, ведущий научный сотрудник

Людин Валерий Борисович, доктор технических наук, профессор, Российский государственный аграрный заочный университет, профессор

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «26» декабря 2016 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета), [https://www.mai.ru/upload/iblock/3cc/dissertatsiya\\_saba\\_akbari.pdf](https://www.mai.ru/upload/iblock/3cc/dissertatsiya_saba_akbari.pdf).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.125.08, д.т.н, профессор



Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время все более актуальной задачей становится контроль качества воздуха, который включает в себя контроль концентрации углеводородов, угарного и углекислого газов, кислорода и др. газов как в жилых и промышленных помещениях, так и на открытых пространствах.

Наиболее эффективное осуществление мониторинга газового состава окружающей атмосферы может быть осуществлено путём развертывания беспроводных сенсорных сетей, охватывающих большие территории и обеспечивающих непрерывный контроль наличия горючих, токсичных и взрывоопасных газов. Проводные датчики применяемые в настоящее время, могут оказаться непрактичными в некоторых задачах когда сеть состоит из тысяч сенсорных модулей. Причина заключается в том, что проводить кабельные линии в таких случаях с учетом существующих физических обстоятельств или огромного количества времени необходимого для развертывания проводных датчиков, может считаться невозможным.

Однако необходимо отметить, что при отсутствии питания от кабельных линий, время работы беспроводных газовых датчиков ограничивается емкостью батарей. Эта проблема усложняется, когда осуществляется мониторинг горючих газов, поскольку, датчики указанного типа потребляют значительное количество энергии. Процедура замены батарей в беспроводных сенсорных сетях содержащих огромное количество датчиков отнимает много времени особенно когда беспроводная сенсорная сеть развернута в неблагоприятном месте в плане климатических и географических условий, что и является важным в задачах нефтегазовой промышленности, таких как, мониторинг газа по трубопроводным сетям.

Таким образом, задача обеспечения стабильного источника питания для беспроводных датчиков газа является актуальной. Для того, чтобы увеличить время автономной работы датчиков газа, одним вариантом является питание беспроводных датчиков от возобновляемых источников энергии. В природе существуют разные виды энергии которые можно собирать и преобразовывать в электрическую энергию.

В данной работе разрабатывалась энергоустановка, которая аккумулирует энергию от Солнца и ветра для питания беспроводных датчиков газа предназначенных для работы в составе беспроводной сенсорной сети. Для проектирования энергоустановки необходимо выбрать источники энергии на основе анализа мощностных характеристик датчиков газа, проанализировать варианты проектирования схемы регулирования мощности и выбрать

параметры для ее реализации учитывая требования по мощности компонентов беспроводного газового датчика, разработать схему источника питания и алгоритмы по оптимизации сбора энергии от альтернативных источников энергии.

**Цель диссертационной работы.** Разработка технологических принципов создания энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии для питания маломощных беспроводных датчиков взрывоопасных и токсичных газов функционирующих в составе беспроводных сенсорных сетей.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- Анализ возобновляемых источников энергии для эффективного использования в малопотребляющих электронных устройствах и системах.
- Определение конструктивно-технологических принципов создания энергоустановки для питания беспроводных датчиков газа от возобновляемых источников энергии;
- Разработка алгоритмов зарядки накопительного элемента и оптимизация сбора энергии от альтернативных источников энергии;
- Создание экспериментального образца энергоустановки по аккумулярованию энергии от возобновляемых источников энергии и исследование его параметров.

#### **Вклад автора в проведенное исследование:**

Соискателем:

- принято участие в постановке задач и выборе объектов.
- разработано схемотехническое решение энергоустановки аккумулирующей энергию Солнца и ветра для питания беспроводных датчиков газа.
- разработан алгоритм для оптимизации сбора солнечной энергии обуславливающий увеличению эффективности зарядки суперконденсаторов.
- предложен способ коммутирования зарядки суперконденсаторов.
- получены экспериментальные результаты. Исследована работа энергоустановки для обеспечения автономной работы беспроводных датчиков газа.

#### **Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:**

1. Предложено схемотехническое решение энергоустановки, собирающей и аккумулирующей альтернативную энергию Солнца и ветра для питания

малопотребляющих устройств, в частности, беспроводных газовых датчиков, предназначенных для функционирования в составе автономных беспроводных сенсорных сетей и обеспечивающих мониторинг газового воздуха и передачу данных по радиоканалу.

2. Разработан алгоритм оптимизации сбора энергии для солнечной энергии, заключающийся в увеличении эффективности зарядки суперконденсаторов.
3. Показана эффективность использования суперконденсаторов в качестве накопителей альтернативной энергии в энергетической установке. Предложено решение, обеспечивающее эффективную зарядку суперконденсаторов от солнечной батареи и ветрогенератора, в случае завершения зарядки одного суперконденсатора за счет перенаправления энергии на не полностью заряженный второй суперконденсатор.
4. Показана возможность длительной автономной работы беспроводных датчиков угарного газа и метана с питанием от разработанной энергоустановки, что позволяет использовать датчики для мониторинга токсичных и взрывоопасных газов в местах с отсутствующим сетевым питанием.

**Метод исследований.** Для решения поставленных задач были осуществлены теоретические расчеты и выполнены экспериментальные исследования показавшие хорошие совпадения теории с экспериментом.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Схемотехническое решение энергоустановки и эффективность использования суперконденсаторов в качестве накопителей возобновляемой энергии в энергетической установке для питания малопотребляющих устройств, в частности, беспроводных газовых датчиков, предназначенных для функционирования в составе автономных беспроводных сенсорных сетей и обеспечивающих мониторинг газового воздуха и передачу данных по радиоканалу в местах с отсутствующим электрическим питанием.

2. Оптимизация сбора энергии от солнечной панели проводится путем изменения времени разрядки и сравнения выходной мощности солнечной панели до и после зарегистрированных изменений. При достижении максимальной выходной мощности солнечной панели балансировка прекращается. Перебалансировка тока нагрузки солнечной панели выполняется периодически путем нового изменения времени разрядки и нахождения новой оптимальной точки.

3. Способ, обеспечивающий эффективную зарядку суперконденсаторов от солнечной батареи и ветрогенератора, в случае завершения зарядки одного суперконденсатора за счет перенаправления энергии на не полностью заряженный второй суперконденсатор.

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных результатов достигается путем сравнения экспериментальных данных с апробированными моделями и применением вычислительных средств.

**Практическая ценность работы.**

1. Разработана новая высокоэффективная энергоустановка по аккумулированию энергии от возобновляемых источников энергии. Разработанная энергоустановка состоит из устройства сбора энергии (ветрогенератора и солнечной панели), двух суперконденсаторов, первичного литиевого элемента, коммутационного блока, блока выбора источника питания, преобразователя напряжения и микроконтроллера.

2. Исследована работа энергоустановки для обеспечения питания беспроводных датчиков угарного газа и метана, предназначенных для автономной работы в составе беспроводных сенсорных сетей по мониторингу токсичных и взрывоопасных газов в местах с отсутствующим сетевым питанием.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** В данной диссертационной работе проводится проектирование, разработка и экспериментальная отработка маломощной энергоустановки с новой принципиальной схемой сбора и аккумулирования энергии от возобновляемых источников энергии (в качестве которых применяется энергия Солнца и ветра). Исследование, проведенное в данной работе, направлено на применение энергоустановки для ее параллельной работы с резервными источниками питания (как батареи) или в качестве автономного источника для питания беспроводных газовых датчиков. В данной диссертационной работе также рассмотрены и разработаны режимы оптимизации процесса сбора энергии от возобновляемых источников энергии и использования собранной энергии для беспроводных газовых датчиков. Исходя из изложенного, выполненная работа соответствует специальности 05.14.08 (пункты 1, 2 и 3 Паспорта этой специальности).

**Реализация результатов работы.** Разработан и изготовлен экспериментальный образец энергоустановки по сбору энергии от возобновляемых источников энергии. Проведено исследование разработанной энергоустановки для питания беспроводных датчиков угарного газа и метана.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной Молодежной Конференции «XLII Гагаринские Чтения»; Международной Молодежной Конференции «XLI Гагаринские Чтения»; Международной Молодежной Конференции «XL Гагаринские Чтения»; Международной Молодежной Конференции «XXXIX Гагаринские Чтения»; Международной конференции IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems 2016, Международной

конференции IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC'15) 2015, Международной конференции Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2014.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ в том числе 1 научная статья в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК при Минобрнауки России. 2 статьи были опубликованы в зарубежных изданиях, входящих в систему цитирования Scopus и WoS. 8 статей были опубликованы в прочих изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 101 страницах машинописного текста, списка литературы из 75 наименований и содержит 47 рисунков и 7 таблиц.

### Содержание работы

**Во введении** кратко раскрывается современное состояние и актуальность темы диссертации, сформулированы основные задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** диссертации выполнен обзор состояния дел в области сбора энергии от возобновляемых источников энергии для питания малопотребляющих электронных устройств, проведен анализ методов сбора энергии от указанных источников энергии для питания беспроводных датчиков.

Показано, что в настоящее время для питания датчиков газа используется сетевое питание, что ограничивает область их применения. Для преодоления данного недостатка разрабатывалось несколько направлений:

- оптимизация энергопотребления беспроводных датчиков газа.
- сбор и аккумулирование доступной энергии от возобновляемых источников энергии.

Оптимизация энергопотребления позволяет продлить время автономной работы беспроводных газовых датчиков в несколько раз. Однако заряд батарей рано или поздно заканчивается. Поэтому особенно актуальным является разработка энергоустановки для сбора энергии.

Рисунок 1 демонстрирует перечень возобновляемых источников энергии. Видно, что источниками возобновляемой энергии могут являться: Солнце, ветер, вода, приливы и отливы, геотермальная энергия, биоэнергетика, вибрация, радиоволны, термоэлектричество и пирозлектричество. Таблица 1 иллюстрирует типовые значения выходной мощности для тех источников возобновляемой энергии, которые можно применять в задачах питания беспроводных сенсорных сетей.

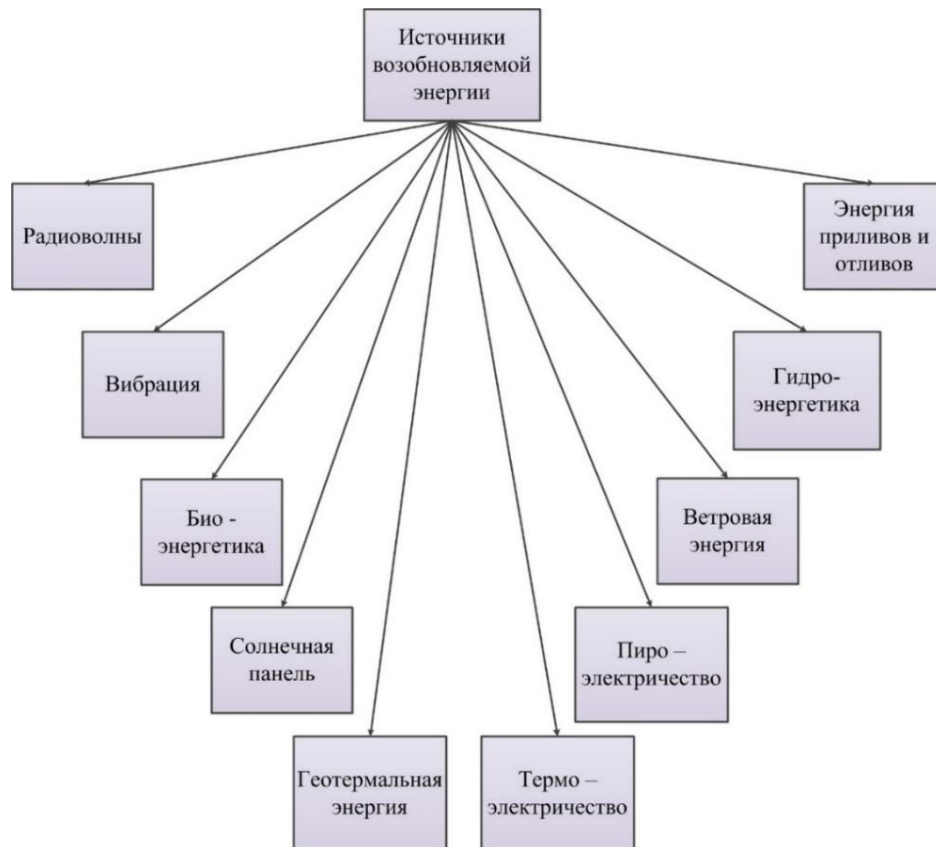


Рисунок 1 - Виды возобновляемых источников энергии.

Основными потребителями энергии в беспроводных газовых датчиках являются сенсоры, микроконтроллеры и приемо-передатчики. Сенсоры бывают каталитическими, полупроводниковыми, электрохимическими и инфракрасными. Среди них электрохимические сенсоры, исходя из их принципа действия, обладают наименьшим энергопотреблением.

В полупроводниковых и каталитических датчиках энергопотребление увеличивается, поскольку для проведения процесса измерения нужен нагрев чувствительного элемента.

Таблица 1-Характеристики типичных источников энергии

Источник	Условия	Плотность мощности
Солнечная энергия	На открытом воздухе	0,1 Вт/см <sup>2</sup>
Солнечная энергия	В закрытом помещении	10 <sup>-4</sup> Вт / см <sup>2</sup>
Вибрация	1м/с <sup>2</sup>	10 <sup>-4</sup> Вт / см <sup>3</sup>
Радиоволны	WiFi	10 <sup>-9</sup> Вт / см <sup>2</sup>
Радиоволны	GSM	10 <sup>-7</sup> Вт / см <sup>2</sup>
Термоэлектричество	$\Delta T = 5^\circ\text{C}$	6·10 <sup>-5</sup> Вт / см <sup>2</sup>
Пироэлектричество	Скорости изменения температуры: 8,5 °C/с	8,64·10 <sup>-6</sup> Вт/см <sup>2</sup>
Ветровая энергия	Ветер (скорость ветра: 4 м/с, тип ветрогенератора: с горизонтальной осью и 4-мя лопастями, диаметр лопастей: 6,3 см, Выходная мощность: ~7,8 мВт)	(0,00025 Вт/см <sup>2</sup> )



Оптические датчики в свою очередь потребляют значительное количество мощности. Это связано с тем, что для их работы нужно обеспечить питание излучателя и сенсора.

Передачики, применяемые для беспроводных сенсорных сетей, работают на основе спецификации Zigbee которая применяется при передаче небольших пакетов данных для малопотребляющих электронных устройств. Максимальная скорость передачи данных при использовании указанного стандарта составляет 250 килобит в секунду.

Микроконтроллеры часто применяются в беспроводных сенсорных сетях. Беспроводные сенсорные сети оснащены процессорами с низким энергопотреблением и они отличаются от стандартных процессоров в плане энергоэффективности и низкой стоимости. Исходя из проведенного анализа, в конце первой главы сформулирована задача работы.

**Во второй главе** диссертации были определены теоретические основы создания энергоустановки по сбору энергии от альтернативных источников энергии.

Как уже было показано в первой главе, при отсутствии питания от электрической сети, время работы беспроводных газовых датчиков ограничивается емкостью батарей, которая расходуется на питание сенсоров, микроконтроллера и приема-передатчика.

Поэтому был проведен анализ энергопотребления основных компонентов беспроводных газовых датчиков. Потребление энергии другими элементами электрической схемы можно на данном этапе не учитывать. В таблице 2 представлен анализ энергопотребления беспроводного датчика газа на основе батарей емкостями 3000, 8000 и 15000 мАч. Потребление приемопередатчика и МК зависит от режимов их работы и может изменяться на несколько порядков. Например, передатчик ETRX35x который работает по стандарту Zigbee потребляет примерно 1 мкА в спящем режиме, а в активном режиме имеет энергопотребление 31 мА при +3 дБм.

Сенсоры газов, такие как каталитические, полупроводниковые и инфракрасные потребляют значительное количество энергии по сравнению с другими компонентами беспроводного датчика. В тоже время электрохимический датчик практически не потребляет энергии. Микроконтроллер имеет наименьшее энергопотребление среди остальных компонентов беспроводного газового датчика.

Согласно таблице 2, максимальная потребляемая мощность беспроводного газового датчика составляет 261 мВт при напряжении 3 В, поэтому энергоустановка по аккумулярованию энергии должна обеспечить указанную мощность для работы беспроводного газового датчика. Исходя из таблиц 1 и 2, данные параметры могут быть обеспечены только за счет достаточно мощных источников альтернативной энергии, а именно, Солнца и ветра.

Предполагаемое число циклов заряд-разряд в течение 10 лет работы (порядка 100 000 раз) однозначно определяет выбор суперконденсатора в качестве накопителя энергии.

Преимуществом суперконденсатора также является возможность накопления электрической энергии при любом подаваемом напряжении внутри рабочей области. В то же время первичный литиевый элемент требует напряжение зарядки 4,1 В и специальный алгоритм зарядки.

Для обеспечения непрерывной работы необходим резервный источник питания - батарея. По своим параметрам для этой цели лучше всего подходит первичный литиевый элемент. Первичные литиевые элементы имеют напряжение 3,6 В и ток 3000 мА, 8000 мА и 15000 мА для типов АА, В и Д, соответственно.

Первичный литиевый элемент также предпочтительнее аккумулятора, так как срок ее службы достигает 10 лет а саморазряд не превышает 1 % в год. Поэтому накопитель энергии должен быть гибридным, т.е. включать в себя суперконденсатор и первичный литиевый элемент.

Таблица 2 – Расчет энергопотребления и времени работы беспроводных датчиков CO и CH<sub>4</sub>

Тип сенсора	Мощность сенсора		Мощность микроконтроллер ATmega32A4		Мощность передатчика ETRX35x		Суммарная потребляемая мощность	
	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим
Электрохим. сенсор NAP-505	0	15 мкВт	2 мкВт	3,3 мВт	3 мкВт	93 мВт	5 мкВт	~96 мВт
Тип первичного элемента				Время автономной работы беспроводного датчика				
				Активный режим				
AA, 1,5 В, 3000 мАч				47 ч				
C, 1,5 В, 8000 мАч				125 ч				
D, 1,5 В, 15000 мАч				234 ч				
Тип сенсора	Мощность сенсора		Мощность микроконтроллер ATmega32A4		Мощность передатчика ETRX35x		Суммарная потребляемая мощность	
	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим
Каталит. сенсор ДТК-2	0	165 мВт	2 мкВт	3,3 мВт	3 мкВт	93 мВт	5 мкВт	~261 мВт
Тип первичного элемента				Время автономной работы беспроводного датчика				
				Активный режим				
AA, 1,5 В, 3000 мАч				17 ч				
C, 1,5 В, 8000 мАч				46 ч				
D, 1,5 В, 15000 мАч				86 ч				

Блок схема предложенной энергоустановки представлена на рисунке 2. Таким образом, энергоустановка должна состоять из следующих частей: входной блок, включающий в себя первичный литиевый элемент и альтернативные источники питания (солнечная батарея, ветрогенератор и др.), блок коммутации и хранения энергии, блок выбора источника питания и преобразователь напряжения. Выбор преобразователя напряжения зависит от формы выходного сигнала аппарата сбора энергии (т.е. он может быть AC или DC), рабочего напряжения накопительного элемента и беспроводного газового датчика.

Чтобы не усложнять схему энергоустановки, в качестве ветрогенератора был выбран ветрогенератор постоянного тока. Беспроводной газовый датчик требует стабилизированное и постоянное напряжение. Для этой цели можно использовать линейные регуляторы или импульсные преобразователи постоянного тока.

Главными достоинствами, связанными с линейными регуляторами, считаются их простота схемы и низкий уровень шума. С другой стороны, их эффективность уменьшается по мере возрастания разности входного напряжения от выходного.

Преимуществом импульсных преобразователей являются их высокая эффективность (примерно 90%). В качестве недостатка можно привести создаваемый шум. В данной работе использован повышающий преобразователь TPS61200. Причина заключается в том, что он может работать с низкими уровнями напряжения (0,3...5,5 В) создаваемыми устройствами сбора энергии и накопителями энергии примененными в данной работе.

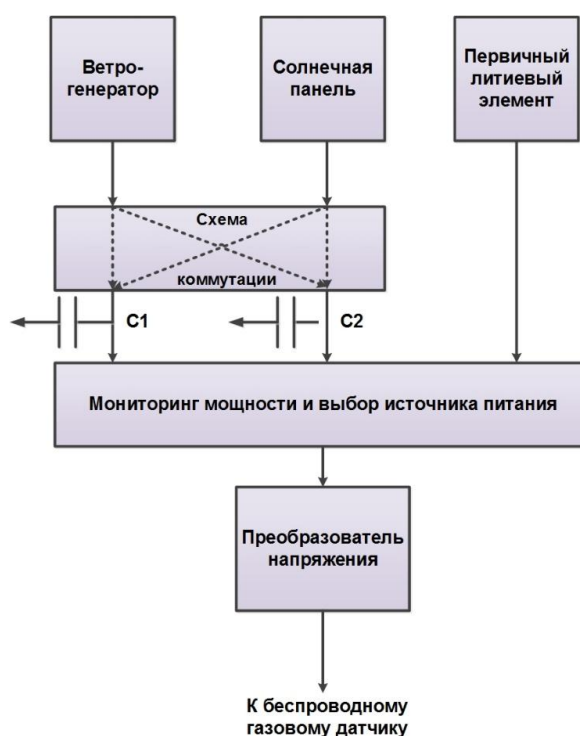


Рисунок 2 - Блок схема энергоустановки по аккумулярованию энергии от возобновляемых источников энергии.

TPS61200 может выработать ток, необходимый (87 мА в соответствии с таблицей 2) для работы беспроводного газового датчика, с эффективностью примерно 90%.

Чтобы увеличить скорость зарядки суперконденсаторов, необходимо собирать энергию на пике мощности (рис.3). Самый эффективный способ использования солнечной панели заключается в поддержании нагрузки солнечной панели на уровне точки максимальной мощности (нахождение точки максимальной мощности - MPPT). Этот способ увеличивает эффективность процесса зарядки накопительного элемента и он реализуется путем применения DC/DC преобразователя.

Работа в других точках кривой ВАХ приведет к значительному снижению выходной мощности, следовательно, уменьшению эффективности. Процесс зарядки от солнечной панели включает в себя два режима DC/DC преобразования: понижающий и повышающий. Указанное преобразование проводится с постоянным временем зарядки (т.е., включения) и разрядки (т.е., выключения). Преобразователь работает в понижающем режиме когда напряжение суперконденсатора меньше чем выходное напряжение солнечной панели. В противном случае выбирается повышающий режим. Время разрядки управляется алгоритмом балансировки тока нагрузки. Нахождение точки максимальной мощности солнечной панели осуществляется путем декрементного изменения времени разрядки индуктивного элемента и сравнением выходной мощности солнечной панели до и после этих изменений. Если выходная мощность солнечной панели максимальна, балансировка прекращается. Перебалансировка тока нагрузки солнечной панели выполняется периодически путем нового изменения времени разрядки и нахождения новой оптимальной точки.

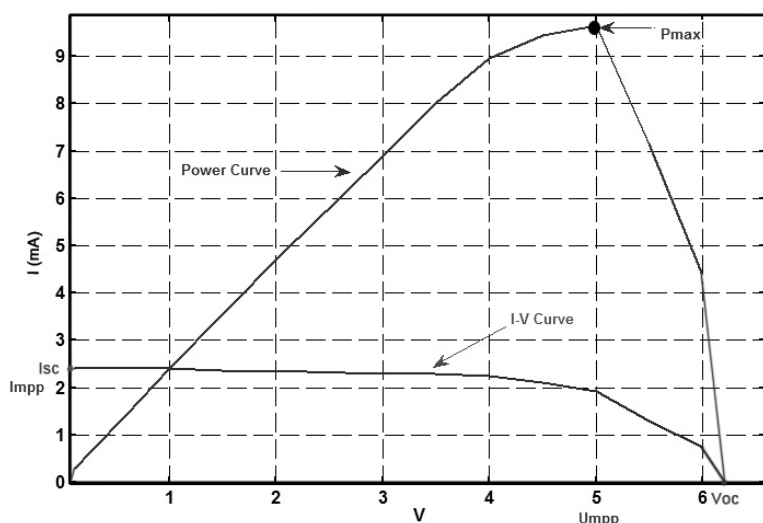


Рисунок 3 - Кривые мощности и ВАХ солнечной панели.

Третья глава диссертации посвящена разработке электрической схемы энергоустановки по аккумулированию энергии от альтернативных источников энергии и описанию ее работы. Для работы беспроводного газового датчика, необходимо обеспечить напряжение в диапазоне 1,8 –5,5 В. Этому требованию удовлетворяет DC-

DC преобразователь TPS61200, имеющий выходной ток до 1 А. Данный DC-DC преобразователь стабилизирует выходное напряжение на любые уровни из диапазона 1,8 – 5,5 В при подаче на его вход и от 0,3 – 5,5 В. Таким образом, значение входного напряжения ограничено 5,5 В.

Для накопления энергии в данной работе были выбраны суперконденсаторы емкостью  $C = 400 \text{ Ф}$  и  $U_{\text{ном}} = 2,7 \text{ В}$ . В соответствии с предложенной схемой существует возможность подключить любые конденсаторы до максимального напряжения 5,5 В, поскольку, указанная величина является предельным значением входного напряжения, которое можно подать в DC-DC преобразователь TPS61200. Следовательно, напряжение на выходе солнечной панели и ветрогенератора не должно быть больше 2,7 В. При этом, исходя из параметров электрических компонентов, максимальный ток не должен превышать 0,54 А (рис. 4). В качестве резервного источника энергии был выбран первичный литиевый элемент с напряжением 3,7 В. Параметры солнечной панели, ветрогенератора и накопительных элементов приведены в таблице 3. Во входной блок энергоустановки (рис. 4) входят первичный литиевый элемент и альтернативные источники питания, которые подключаются к входным разъемам схемы источника питания.

К первому каналу подключается солнечная батарея, к второму каналу подключается ветрогенератор.

Входные напряжения от первичного литиевого элемента и альтернативных источников питания (солнечной и ветровой энергии) поступают на коммутационный блок, который в случае необходимости осуществляет их подключение к конденсаторам, в которых осуществляется хранение энергии.

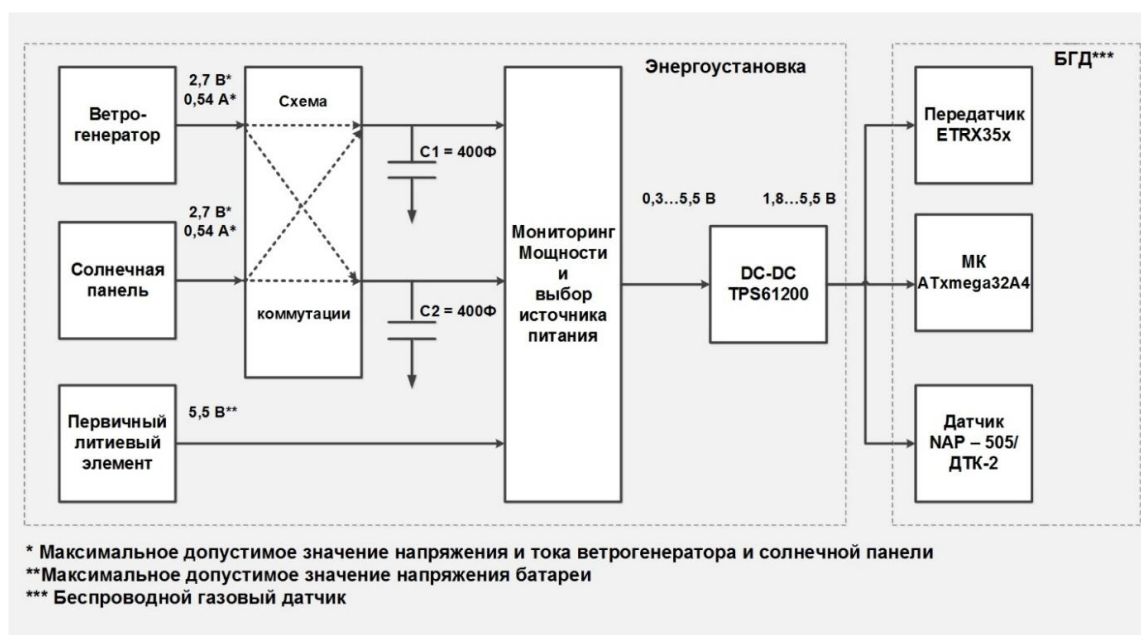


Рисунок 4 - Блок схема беспроводного газового датчика с питанием от энергоустановки.

Таблица 3 – Мощности накопителей энергии и устройств сбора энергии

	Первичный литиевый элемент	Суперконденсатор ( $V_{max} = 2,7 \text{ В}$ , $V_{min} = 0,9 \text{ В}$ , $C = 400 \text{ Ф}$ )	Ветрогенератор (при скорости ветра 4,3 м/с)	Солнечная панель (при излучении 1,5 АМ)
Напряжение (В)	3,7 В	2,7	2,2	2,2
Ток (мА)	3200	133,7	27	350
Мощность (мВт)	11840	361	59	770

Накопление энергии от каждого альтернативного источника осуществляется независимо. Управление зарядкой конденсаторов осуществляется программно с помощью микроконтроллера. Микроконтроллер осуществляет измерения напряжений на конденсаторах и первичном литиевом элементе и осуществляет переключение ключей коммутатора в зависимости от полученных значений напряжения.

Аналогичным образом осуществляется управление используемым источником напряжения. В зависимости от полученных значений напряжения на конденсаторах и первичном литиевом элементе, выбирается один из источников, напряжение которого подается на вход преобразователя и используется для получения заданного выходного напряжения.

Основой схемы является микросхема DC-DC преобразователя напряжения. Диапазон входных напряжений преобразователя составляет от 0,3 В до 5,5 В. Как было ранее указано, данный преобразователь обеспечивает ток до уровня 1 А. Переключение с питания от резервного источника питания (первичного литиевого элемента) к питанию от альтернативных источников энергии происходит, когда напряжение на одном из суперконденсаторов превысит 0,9 В.

Выбор источника питания от солнечной батареи или от ветрогенератора происходит,

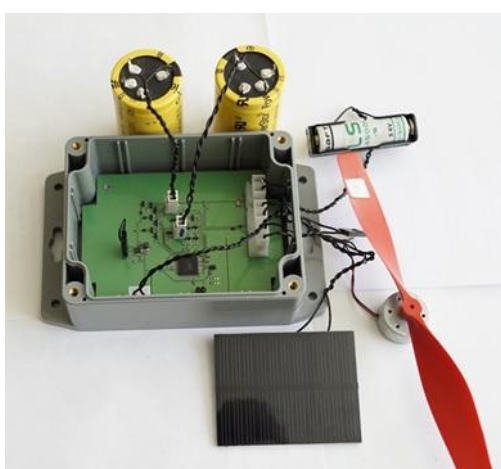


Рисунок 5 - Внешний вид энергоустановки.

исходя из сравнения значений напряжения на конденсаторах. Для питания выбирается тот конденсатор, который больше заряжен и, следовательно, у которого выше напряжение на выходе. Внешний вид энергоустановки иллюстрирован на рис. 5.

**В четвертой главе** диссертации представлены результаты исследований энергоустановки в составе беспроводных газовых датчиков с возобновляемыми

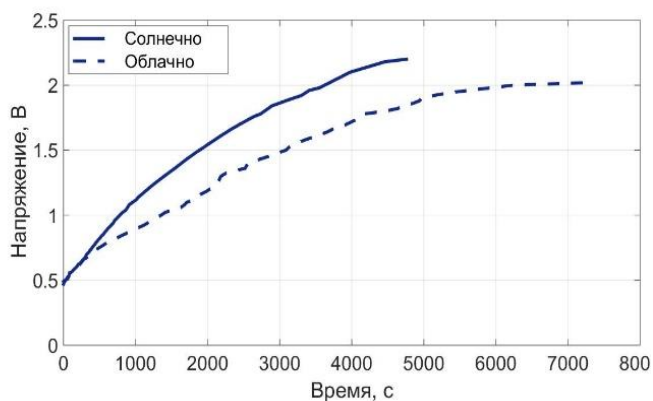


Рисунок 6 - Зарядка суперконденсатора от солнечной панели.

показывает процесс зарядки конденсатора от солнечной батареи при солнечной погоде. Эксперимент проводился в один из солнечных дней в мае в Москве. Из полученных данных видно, что для заряда конденсатора до напряжения 2,2 В требуется немногим более одного часа. Однако, когда напряжение достигает уровня 2,3 В, процесс разрядки замедляется. Пунктирная кривая на рис. 6 показывает процесс зарядки конденсатора от солнечной батареи при переменной облачности, при этом время зарядки увеличивается.

Рис. 7 иллюстрирует время, необходимое для зарядки суперконденсатора до 2,7 В при постоянной скорости ветра 4 м/с. Ветер был сгенерирован вентилятором. Для измерения скорости был использован анемометр VOLT CRAFT (BL – 30). Полная зарядка конденсатора требует около 20 часов. На рис. 8 показано уменьшение напряжения на суперконденсаторе без нагрузки в течение примерно одной недели. В начальный момент времени разрядка конденсатора происходит быстро. Однако, когда напряжение достигает уровня 2,3 В, процесс разрядки замедляется. Энергия каждого суперконденсатора при полной зарядке составляет 1450 Дж или 0,41 Вт·ч. Теоретические расчеты показывают, что для каждого суперконденсатора который полностью заряжен, время автономной работы

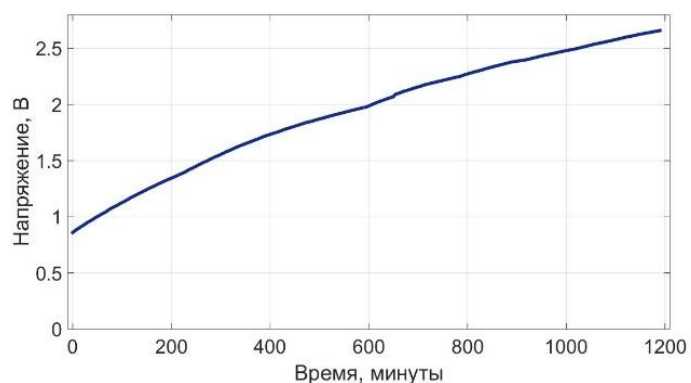


Рисунок 7 - Зарядка суперконденсатора от ветрогенератора при скорости 4 м/с.

источниками энергии. В данной главе приведены данные по сбору и аккумулярованию энергии в энергоустановке. Показана оценка автономной работы датчиков CO и CH4 на основе энергоустановки по сбору энергии.

На рис 6 представлены кривые зарядки конденсатора от солнечной батареи. Сплошная кривая на рис. 6

датчика CO составляет 360 часов.

Однако при эксперименте суперконденсаторы разрядились за 240 часов (рис. 9). Для датчика метана это время равняется 28 часам в отличие от теоретического времени 48 часов (рис. 10). Причина связана с явлением саморазряда суперконденсаторов а также потерями в DC – DC

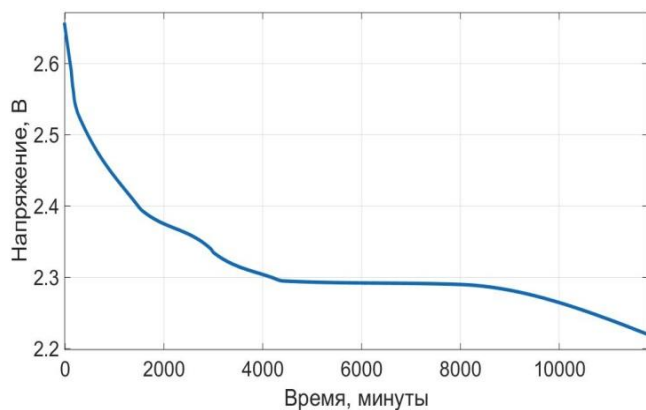


Рисунок 8 - Саморазряд суперконденсатора в течение 6 дней.

преобразователе. Напряжение переключения питания с первичного литиевого элемента на альтернативные источники выбрано 0,9 В, исходя из следующих соображений. По своим техническим параметрам ДС-ДС преобразователь должен стабилизировать напряжение на выходе, начиная с 0,4 В на входе.

Экспериментальные исследования показали, что при подаваемых напряжениях на ДС-ДС преобразователь ниже 0,9 В он не поддерживает стабилизированное напряжение 3,3 В на выходе. Это связано с тем, что энергии, запасенной в суперконденсаторе при напряжении меньшем, чем 0,9 В, недостаточно, чтобы обеспечить устойчивое питание потребителя энергии. Большая часть энергии, поступающей на вход ДС-ДС преобразователя, рассеивается в его схеме. Необходимо отметить, что энергия, запасенная в суперконденсаторе при напряжении на его обкладках 0,9 В, составляет всего 10 % от энергии, запасённой при напряжении 2,7 В. При этом, согласно техническим характеристикам, КПД преобразования ДС-ДС

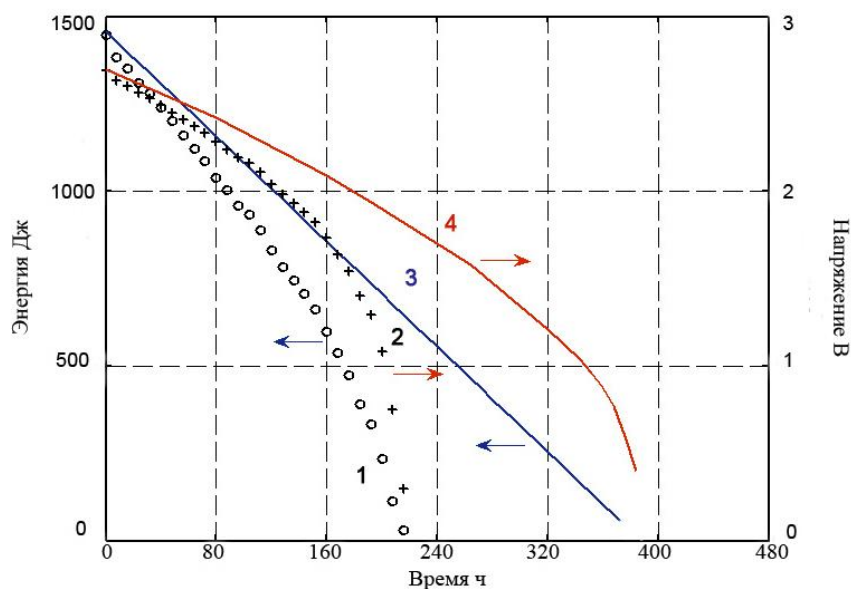


Рисунок 9 - Теоретические (сплошные) и экспериментальные (точечные) кривые уменьшения запасенной энергии (цифры «1» и «3») в суперконденсаторе и напряжения на его обкладках (цифры «2» и «4») в зависимости от времени работы для беспроводного датчика угарного газа.



преобразователя при напряжении менее 0,9 В на его входе меньше 50 %. Поэтому не имеет смысла бороться за возможность питания датчика от напряжения менее 0,9 В. Это не приведет к существенному увеличению времени его автономной работы. Различие между сенсорами CO и CH<sub>4</sub> состоит в потреблении энергии. Исходя из принципа действия, потребление сенсора CO лежит на уровне микроватта а датчик CH<sub>4</sub> потребляет порядка милливатта.

Чтобы уменьшить энергопотребление датчика в данной работе осуществляются периодические измерения. Далее обсуждались перспективы применения энергоустановок по сбору энергии от возобновляемых источников энергии. Одной из областей, где беспроводные газовые датчики могут применяться, считается нефтегазовая промышленность, например для мониторинга утечки газов по трубопроводным сетям. Некоторые из нефтегазовых предприятий расположены в удаленных и неблагоприятных местах. Поэтому проводить кабельные линии для питания датчиков является сложным. При отсутствии питания от электрической сети, время работы беспроводных газовых датчиков ограничивается емкостью батарей, и замена батарей отнимает много времени.

При мониторинге горючих и токсичных газов необходимо поддерживать стабильное питание для датчиков газа. Для того, чтобы увеличить время автономной работы датчиков газа, одним вариантом является питание их от возобновляемых источников энергии. Солнечная и ветровая энергии могут присутствовать в большом количестве при задачах

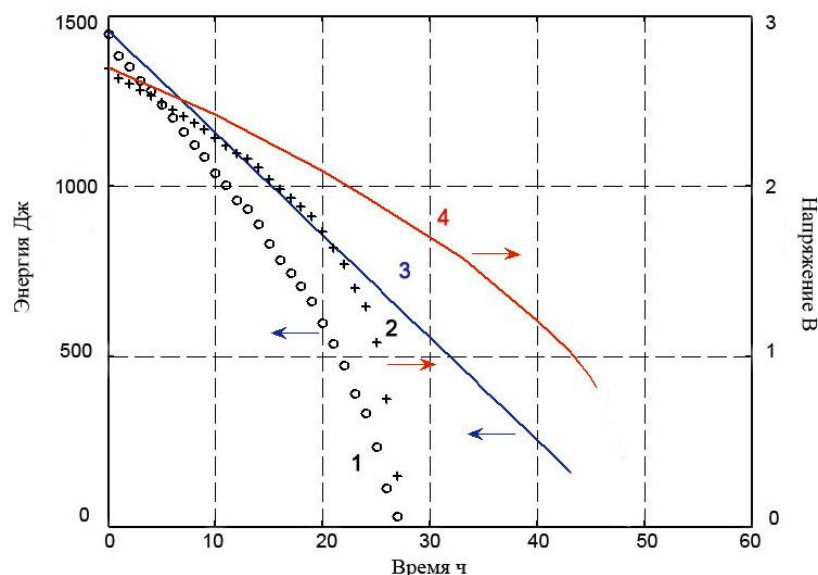


Рисунок 10 - Теоретические (сплошные) и экспериментальные (точечные) кривые уменьшения запасенной энергии (цифры «1» и «3») в суперконденсаторе и напряжения на его обкладках (цифры «2» и «4») в зависимости от времени работы для беспроводного датчика метана.

мониторинга в нефтегазовых полях. Энергоустановка, предложенная в данной работе, аккумулирует энергию от указанных источников возобновляемой энергии и увеличивает время автономной работы беспроводных газовых датчиков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Разработана новая высокоэффективная энергоустановка по аккумулярованию энергии от возобновляемых источников энергии. Разработанная энергоустановка состоит из устройства сбора энергии (ветрогенератора и солнечной панели), двух суперконденсаторов, первичного литиевого элемента, коммутационного блока, блока выбора источника питания, преобразователя напряжения и микроконтроллера.
2. Предложено использовать в качестве накопителей альтернативной энергии суперконденсаторы в энергоустановке для питания автономных беспроводных газовых датчиков, предназначенных осуществлять мониторинг токсичных и горючих газов и передачу данных по радиоканалу в местах с отсутствующим электропитанием.
3. Проанализированы схемы преобразователей напряжений для применения в схеме энергоустановки. В данной работе выбран преобразователь TPS61200 который работает в диапазоне от 0,3-5,5 В, что соответствует напряжениям генерируемым солнечной панелью и ветрогенератором. Более того, указанный преобразователь вырабатывает ток необходимый для работы датчиков CH<sub>4</sub> с эффективностью 90%, для датчика CO она составляет примерно 80%.
4. Благодаря возможности сбора энергии одновременно от более чем одного альтернативного источника энергии, значительно увеличивается время автономной работы беспроводных датчиков газа, предназначенных для автономной работы в составе беспроводных сенсорных сетей по мониторингу токсичных и взрывоопасных газов в местах с отсутствующим сетевым питанием. В качестве резервного источника энергии предложено использовать первичный литиевый элемент, а не аккумулятор, так как саморазряд первичных литиевых элементов примерно 1% в год.
5. Построен алгоритм для оптимизации процесса сбора энергии от солнечной батареи увеличивающий эффективность зарядки суперконденсатора. В соответствии с данным алгоритмом, нахождение точки максимальной мощности солнечной панели осуществляется декрементным изменением времени разрядки индуктивного элемента и сравнением выходной мощности солнечной панели до и после этих изменений. Если выходная мощность солнечной панели максимальна, балансировка

прекращается. Перебалансировка тока нагрузки солнечной панели выполняется периодически путем нового изменения времени разрядки и нахождения новой оптимальной точки.

6. Предложен способ зарядки накопительного элемента на основе которого можно осуществлять зарядку суперконденсатора ветрогенератора от солнечной панели если напряжение на суперконденсаторе солнечной панели достигло максимума. На базе подобного принципа можно проводить зарядку суперконденсатора солнечной панели от ветрогенератора.
7. Исследована работа энергоустановки для обеспечения автономной работы беспроводных датчиков угарного газа и метана. Результаты показывают, что датчик угарного газа может работать 240 часов от каждого полностью заряженного суперконденсатора. Это время для датчика метана составляет 28 часов. Полученные результаты являются следствием разного энергопотребления датчиков CO и CH<sub>4</sub>.
8. Проведены теоретические расчеты времени автономной работы датчиков. Результаты показывают, что потери в DC-DC преобразователе и саморазряд суперконденсатора обуславливают разностью между теоретическими и экспериментальными данным по времени автономной работы беспроводных датчиков газа.
9. Рассмотрены перспективы применения энергоустановки по сбору энергии для беспроводных датчиков газа. Предложена возможность применения разработанной энергоустановки в нефтегазовой промышленности, например, для трубопроводных сетей.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при поддержке Минобрнауки РФ. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57714X0022.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых изданиях:

1. Акбари С., Баранов А.М., Сомов А.С. Спирякин Д.Н. Автономный беспроводной датчик угарного газа с питанием от альтернативных источников энергии // Датчики и Системы, №2, 2016г – С.48-53.
2. Baranov A., Spirjakin D., Akbari S., Somov A., Passerone R. POCO: 'Perpetual' operation of CO wireless sensor node with hybrid power supply // Sensors and Actuators A: Physical, Volume 238, 1 February 2016, Pages 112-121, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.12.004>.

3. Baranov A., Spirjakin D., Akbari S., Somov A. Optimization of power consumption for gas sensor nodes: a survey // *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 233, 1 September 2015, Pages. 279-289, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.07.016>.

Статьи, опубликованные в других изданиях и материалах конференций:

4. Spirjakin D., Baranov A., Akbari S. Energy Harvesting Algorithms for Wireless Multi-Sensor Gas Platform, // *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems*, 13-14 June 2016, Pages.1-6, DOI: 10.1109/EESMS.2016.7504819.
5. Spirjakin D., Akbari S., Somov A., Passerone R. A wireless carbon monoxide sensor node with hybrid power supply // *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC'15)*, 11-14 May 2015, Pages 1019 – 1023, DOI: 10.1109/I2MTC.2015.7151410.
6. Akbari S. Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks Review // *Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*. 07-10 September 2014. Pages 987 – 992, DOI: 10.15439/2014F85.
7. Акбари С. Анализ существующих возобновляемых источников энергии для беспроводных сенсорных систем // *Научные труды (Вестник МАТИ)*, Вып. 24(96).- М.:МАТИ, 2014, - С.89-96.
8. Акбари Саба, Спириякин Д. Н. Платформа аккумуляирования энергии из окружающей среды для питания беспроводного датчика угарного газа // *XLII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения 2016»*, том 3, 2016г – С. 165 – 166.
9. Акбари Саба, Алексей Приставка. Гибридные альтернативные источники энергии для беспроводных газовых датчиков // *XLI Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения 2015»*, том 2, 2015г – С. 241 – 242.
10. Акбари Саба. Ветровая энергия как альтернативный источник для питания датчиков // *XL Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения 2014»*, том 3, 2014г – С. 5 – 6.
11. Акбари Саба. Анализ альтернативных источников для беспроводных датчиков // *XXXIX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения 2013»*, том 3, 2013г – С. 54 – 55.