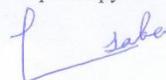


Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Баранов А.М.

Москва - 2016

Оглавление

Введение.....	4
ГЛАВА 1. Энергосберегающие сенсорные системы	
1.1. Беспроводная сенсорная сеть.....	9
1.1.1. IEEE 802.15.4.....	10
1.1.2. Zigbee.....	11
1.2. Описание основных компонентов беспроводной сенсорной сети.....	12
1.3. Сенсорные сети предназначенные для анализа газов.....	14
1.4. Оптимизация энергопотребления датчиков газа.....	19
1.5. Альтернативные источники энергии как новые платформы питания беспроводных газовых датчиков.....	25
1.5.1. Солнечная энергия.....	27
1.5.2. Пьезоэлектричество.....	28
1.5.3. Тепловая энергия.....	30
1.5.4. Радиоволны.....	32
1.5.5. Ветровая энергия.....	33
1.6. Выводы.....	34
ГЛАВА 2. Теоретические основы создания платформы питания беспроводных датчиков от возобновляемых источников энергии	
2.1. Оценка потребления мощности беспроводными датчиками газа.....	36
2.2. Общие понятия для создания энергоустановки по аккумулярованию энергии из окружающей среды.....	40
2.3. Линейные регуляторы.....	43
2.4. Ключевые стабилизаторы напряжения.....	45
2.5. Разработка алгоритма оптимизации сбора солнечной энергии для энергоустановки.....	56
2.6. Выводы.....	58
ГЛАВА 3. Разработка энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии для питания беспроводных датчиков газа	
3.1. Проектирование схемы энергоустановки по аккумулярованию энергии от возобновляемых источников энергии.....	60
3.2. Алгоритмы выбора источника питания и зарядки суперконденсатора.....	66
3.3. Реализация макета интеллектуального источника питания интегрируемого в корпус сенсорного узла с возможностью генерации и накопления энергии Солнца и ветра.....	69
3.4. Выводы.....	74
ГЛАВА 4. Результаты экспериментов проведенных с возобновляемыми источниками энергии и автономная работа датчиков CO и CH ₄ на основе энергоустановки	
4.1. Эксперимент с ветровой энергией.....	77
4.2. Эксперимент с солнечной энергией.....	79
4.3. Автономная работа беспроводного датчика угарного газа на основе питания от возобновляемых источников энергии.....	82
4.4. Автономная работа беспроводного датчика метана на основе питания от возобновляемых источников энергии.....	86

4.5. Перспектива применения энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии для питания беспроводных сенсорных сетей.....	90
4.6. Выводы.....	91
Заключение.....	92
Список литературы.....	94

Введение

В настоящее время все более актуальной задачей становится контроль качества воздуха, которые включают в себя контроль концентрации углеводородов, угарного и углекислого газов, кислорода и др. газов как 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 БСС содержащих огромное количество датчиков отнимает массу времени и она становится более громоздкой когда беспроводная сенсорная сеть развернута в неблагоприятном месте в плане климатических и географических условий, что и может встречаться в нефтегазовых комплексах.

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. Наиболее распространенными источниками энергии являются свет, тепло, радиочастота, ветровая энергия и вибрация. Каждый вид

энергии имеет свои преимущества и недостатки, а применение конкретной технологии сбора энергии зависит от области применения беспроводных датчиков.

В данной работе разработано устройство сбора энергии которое аккумулирует энергию от солнечной и ветровой энергии для питания беспроводных датчиков газа. Для проектирования устройства аккумулирования энергии необходимо исследовать возобновляемые источники энергии (т.е., рассматривать каждый вид энергии, их возможности и ограничения), выбрать источники энергии на основе проведенного анализа и мощностных характеристик датчиков газа, анализировать варианты проектирования схемы регулирования мощности и выбрать параметры для ее реализации учитывая требования по мощности компонентов на борту сенсорного модуля, 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 аккумулированию энергии от возобновляемых источников энергии и исследование его параметров.

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 высоко-эффективная 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. 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.

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.

ГЛАВА 1. Энергосберегающие сенсорные системы

1.1. Беспроводная сенсорная сеть

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) состоит из модулей датчиков распределенных по конкретной территории для измерения параметров окружающей среды, хранения информации и передачи данных по беспроводному каналу. Проблема которая может встречаться в некоторых задачах выполняемых проводными сетями заключается в трудности проведения кабелей связанной с физическими препятствиями и существованием огромного количества датчиков.

В структуру сенсорного модуля входят: передатчик, сенсор, микроконтроллер и блок питания [1]. В сенсорных сетях могут быть один или более базовых станций для сбора данных со всех сенсорных модулей [2]. На рисунке 1.1 представлена структура БСС состоящая из датчиков, базовой станции и пунктов получения информации. Базовая станция передает данные по локальной сети (LAN) или Интернету конечным пунктам. Необходимо отметить, что базовая станция имеет и возможность измерения данных. Беспроводные сенсорные сети могут применяться в промышленных и населенных пунктах. Среди задач выполняющих указанными сетями включают в себя управление умными домами, мониторинг процессов и состояния окружающей среды и т.д [3].



Рис.1.1 Структура одной беспроводной сенсорной сети [4]

1.1.1. IEEE 802.15.4

В БСС применяется стандарт передачи данных IEEE 802.15.4 которая характеризуется низким потреблением мощности и низкой скоростью передачи данных [5]. Как показано на рисунке 2, этот стандарт концентрируется на физическом и MAC (управление доступом к среде) уровнях модели OSI. IEEE 802.15.4 действует с тремя диапазонами частот на физическом уровне. В Америке используется диапазон 902-928 МГц и в Европе IEEE 802.15.4 функционирует в диапазоне 868-868.8 МГц. В других регионах указанный стандарт работает с частотами 2400 – 2483.3 МГц [6]. IEEE 802.15.4 определяет два типа устройств на MAC уровне: устройства с полным функционированием (Full Function Devices – FFD) и устройства с пониженным функционированием (Reduced Function Devices – RFD) [7]. FFD устройства могут выполнять роль координатора [8] который проводит маршрутизацию данных а также они имеют возможность функционировать как обычные модули сети. RFD устройства работают только в качестве обычного модуля для измерения данных и осуществления связи с координатором сети [8].

1.1.2. Zigbee

Zigbee это спецификация передачи небольших пакетов данных для мало энергопотребляющих задач. Максимальная скорость передачи данных при использовании указанного стандарта составляет 250 килобит в секунду. В многих задачах в которых применяется Zigbee беспроводное устройство находится больше времени в спящем режиме [9]. На основании структуры Zigbee находятся физический уровень и MAC уровень стандарта IEEE 802.15.4. На рисунке 1.2 можно видеть, что Zigbee определяет два уровня: сетевой и прикладной. Сетевой уровень (Networking Layer - NWK) обеспечивает механизм маршрутизации и функцию передачи данных по многим переприемам (multihop). Прикладной уровень (Application Layer - APL) содержит подуровень поддержки приложения (Application Support Sublayer – APS), объект устройства Zigbee (Zigbee Device Object – ZDO) и Zigbee приложения которые определены пользователем или конструктором [10]. Объект устройства Zigbee выполняет функцию общего управления устройством и подуровень поддержки приложения обслуживает объекту устройства Zigbee и Zigbee приложениям.



Рис. 1.2 Стек протокола Zigbee [10]

1.2. Описание основных компонентов беспроводной сенсорной сети

Как выше было указано, беспроводная сенсорная сеть состоит из передатчика, сенсора, микроконтроллера и блока питания. Краткое описание этих устройств приведено ниже.

Передатчик – Существуют разные варианты передачи данных которые могут передаваться по инфракрасным, радио и оптоволоконным каналам. Передача по инфракрасному каналу считается экономичным, хотя инфракрасные сигналы не могут проникнуть по непрозрачным объектам и стенам. Передача по радиоканалам является наиболее часто используемым средством связи в беспроводных сенсорных сетях [3]. Это связано с тем, что маленькие пакеты данных могут передаваться по радиоканалу с низкой скоростью и ограниченная дальность передачи обеспечивает возможность повторного использования частот [11]. Трансивер работает в режимах передатчика, приема и спящего.

Микроконтроллер – роль микроконтроллера заключается в выполнении важных задач для обеспечения надлежащего функционирования БСС. В ряд этих задач входят обработка данных и управление действиями других блоков интегрированных в сенсорном модуле [3]. Микроконтроллеры часто применяются в БСС.

БСС оснащены процессорами с низким энергопотреблением [12] и они отличаются от стандартных процессоров в плане энергоэффективности и низкой стоимости [13]. В

Источник питания – этот блок обеспечивает энергию для выполнения измерений, обработка данных и их передачи. Энергия может накапливаться в батареях или суперконденсаторах. На рисунке 1.3 можно видеть, что суперконденсаторы имеют больше удельной мощности (Вт) по сравнению с батареями. Это значит, что электрическая мощность выдаваемая суперконденсаторами в течение короткого времени выше чем та мощность генерируемой батареями. С другой стороны плотность энергии батарей (Вт.ч/л) выше чем плотность энергии суперконденсаторов. Отсюда следует, что батареи могут хранить энергию на более длительное время. Батареи являются основными источниками питания для БСС [14]. В сенсорных сетях применяются два типа батарей: первичные и вторичные (аккумуляторы).

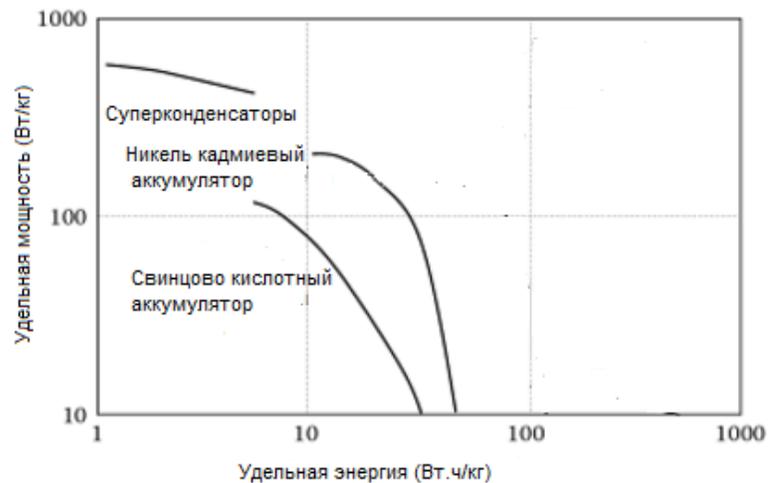


Рис. 1.3 Удельная мощность и энергия батарей и суперконденсаторов – диаграмма Рагона [17]

Сенсор – сенсор проводит измерение параметров окружающей среды таких как температура, давление, концентрация газов и.т.д. Измеряемый сигнал преобразуется в цифровой вид поскольку микроконтроллер только обрабатывает цифровые данные. В настоящее время разрабатываются датчики с возможностью сбора энергии окружающей среды, например, Солнца, температуры, вибрации [14],[15],[16]. Существуют следующие категории сенсоров. Активные сенсоры- такие виды сенсоров проводят измерение параметров окружающей среды излучая энергию в среду или путем модифицирования среды. В качестве примера можно привести радарные сенсоры.

Пассивные сенсоры – с другой стороны пассивные сенсоры проводят измерение без оказания влияния на окружающую среду. Отклик генерируется путем приема данных измеряемой величины на вход сенсора. Термопара является примером пассивного сенсора..

1.3. Сенсорные сети предназначенные для анализа газов

Существуют разные сенсорные системы для обнаружения газов и в этом разделе рассматривается кратко их принцип действия.

Каталитический шариковый датчик (Catalytic Bead Sensor) - в этих датчиках используется каталитический шарик для окисления горючего газа. Проволочную катушку покрывают каталитическим покрытием из стекла или керамического материала и она нагревается до температуры при которой будет сжигать контролируемый газ и в результате этого распространяется тепло и увеличивается сопротивление проволоки. В результате роста температуры проволоки, увеличивается ее сопротивление. Это сопротивление измеряется мостом Уитстона и результат измерения преобразуется в электрический сигнал. В схеме Уитстона применяется второй датчик роль которого заключается в компенсации температуры, давления и влажности. Рисунок 1.4 иллюстрирует каталитический датчик. Данный детектор применяется для обнаружения горючих газов. Термокаталитические сенсоры обладают высоким быстродействием. Однако им свойственен ряд существенных недостатков, к которым можно отнести ограниченный срок службы, уменьшение чувствительности с течением времени, необходимость наличия в измеряемой среде кислорода для обеспечения возможности окисления горючего газа. Кроме того, ряд газов и паров, присутствующие в контролируемой атмосфере могут отравлять сенсор. Термокаталитические средства измерения благодаря простоте своей конструкции

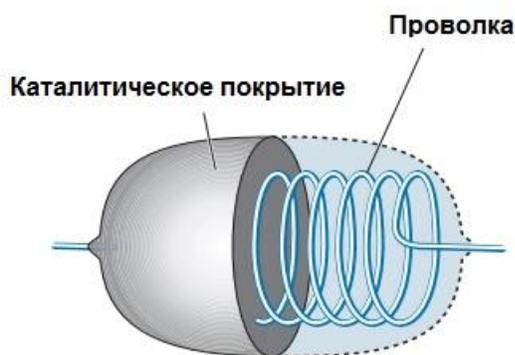


Рис. 1.4 Конструкция каталитического датчика [18]

являются экономически выгодным решением для контроля дозврывоопасных концентраций горючих веществ.

Металло-оксидный полупроводниковый датчик (Metal Oxide Semiconductor Gas Sensor)- в этих датчиках используется полупроводниковый материал который лежит на подложке и находится между двумя электродами. Протекание свободных электронов по границам полупроволникового матреиала осуществляется после того как он нагревается. В чистом воздухе кислород поглощается на поверхности полупроводникового материала и вледствие преобретения электронов полупроводникового материала кислород ионизируется (рис. 1.5).

Указанный процесс обусловливает возникновению потенциального барьера в результате чего предотвращается движение электронов, т.е., создается большое сопротивление. При присутствии отслеживаемого газа происходит окисление кислорода и из за этого электроны заново начинают протекать по полупроводниковому материалу и сопротивление датчика уменьшается. В металло-оксидных полупроводниковых датчиках концентрация газов определяется с измерением сопротивления сенсора. Данный детектор применяется для обнаружения горючих и токсичных газов. Среди преимуществ сенсоров данного типа можно отметить высокую чувствительность, а также низкую стоимость изготовления. Однако, отсутствие селективности, отравляемость и недолговечность сенсора, а также высокая погрешность измерений накладывают существенные ограничения на использование полупроводниковых сенсоров в приборах и системах контроля дозврывоопасных концентраций.

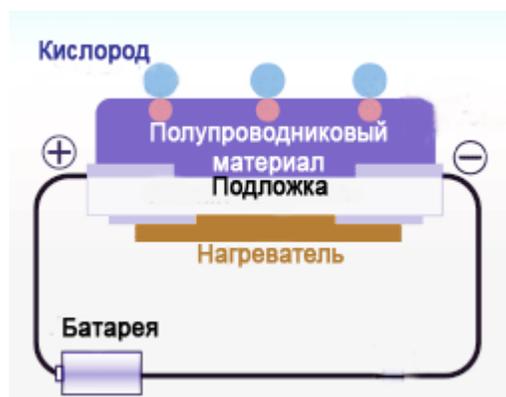


Рис. 1.5 Металло-оксидный полупроводниковый датчик при ионизации кислорода [19]

Детектор газа на основе технологии Point Infrared Short Path – Этот детектор работает на основе технологии “Non Dispersive Infrared (NDIR)” - При этом методе измерения, применяется источник генерирования инфракрасного излучения, два детектора которые преобразуют энергию инфракрасного излучения в электрическую и фильтры для соответствующих детекторов. Каждый детектор чувствителен к разным длинам волн в инфракрасном диапазоне.

Источник генерирования инфракрасного излучения который находится в корпусе направлен через определенное окно в сторону свободного пространства. В конце указанного пространства может стоять зеркало чтобы направлять энергию в сторону окна и детекторов.

Согласно данной технологии, два типа газа подвергаются к инфракрасному излучению. Одним газом является отслеживаемый а другим сравнительный. В качестве сравнительного газа используется инертный газ. Для этого детектор работает с двумя лучами. Количество света полученного от каждого типа сравнивают для определения концентрации отслеживаемого газа. Если существует определенная концентрация отслеживаемого газа тогда она влияет на плотность излучения приходящего к детектору предназначенному для обнаружения отслеживаемого газа но не будет оказывать эффект на плотность излучения приходящего к детектору предназначенному для приема сравнительного газа. Структуру датчика на основе технологии “Non Dispersive Infrared (NDIR)” можно видеть на рисунке 1.6. Данный детектор применяется для обнаружения горючих газов. Неоспоримые достоинства оптических сенсоров: высокая стабильность нуля, чувствительность, селективность, быстрое действие, устойчивость к воздействию агрессивных сред и неотравляемость повышенными концентрациями контролируемых и сопутствующих газов, способность функционировать в бескислородной среде [20]. Недостатком можно считать относительную сложность и как следствие дороговизну конструкции, а также достаточно большое энергопотребление оптических сенсоров.

Электрохимический датчик газа – В конструкцию электрохимического датчика входят, электролит, рабочий, вспомогательный и сравнительный электроды (рис. 1.7). Газ поступает на рабочий электрод через маленькое отверстие. На поверхности рабочего электрода происходит реакция окисления или восстановления.

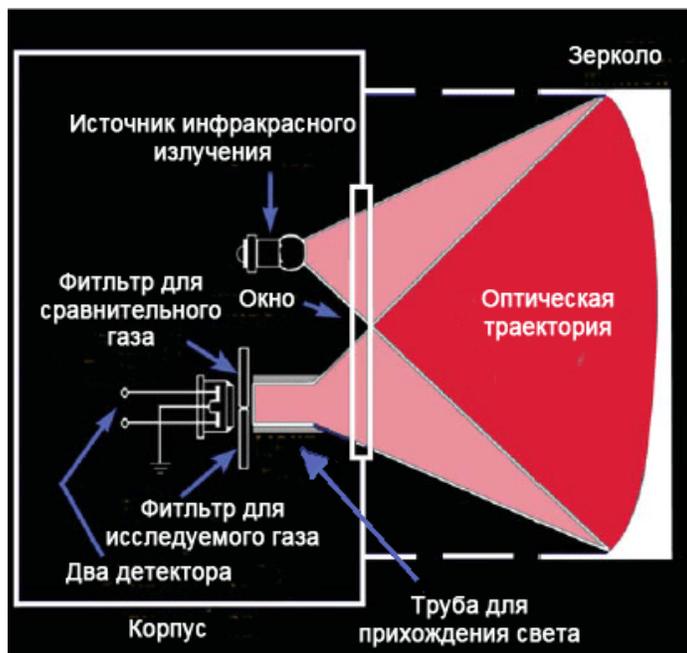


Рис. 1.6 Обнаружение газа на основе технологии Non Dispersive Infrared (NDIR)” [21]

На вспомогательном электроде осуществляется противоположная реакция, т.е., если на рабочем электроде произошло окисление, на вспомогательном электроде будет действовать реакция восстановления. Если подключить нагрузку к электродам протекает ток который соответствует концентрации газа. Поскольку в датчиках работающих с внешним напряжением потенциал на рабочем электроде ухудшается по времени из за постоянно происходящих электрохимических реакций, в электрохимический датчик добавлен электрод сравнения. Этот электрод располагается вблизи рабочего электрода и поддерживает напряжение на рабочем электроде. Данный датчик применяется для обнаружения токсичных газов. К достоинствам электрохимических газовых датчиков относятся линейный отклик, высокая чувствительность и селективность и низкое

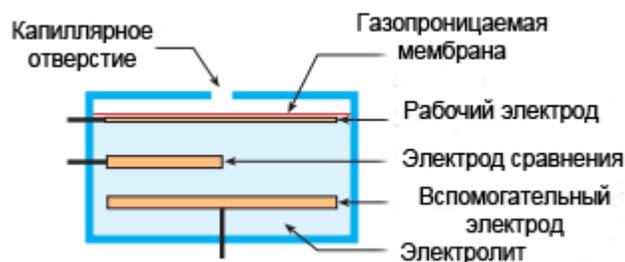


Рис. 1.7 Типичный электрохимический газовый датчик [22]

энергопотребление. В качестве недостатков можно отнести перекрестную чувствительность, ограниченный срок службы. Также время работы указанных датчиков уменьшается в очень сухих и теплых средах.

1.4. Оптимизация энергопотребления датчиков газа

Типичные полупроводниковые и каталитические датчики изготовленные известными фирмами (Figaro [23], Nemoto [24], Hanwei Electronics [25]) имеют высокое энергопотребление и соответственно управление их мощностью в БСС считается важной задачей. Большая часть потребляемой мощности расходуется на нагрев слой катализатора. Типичный подход для снижения энергопотребления каталитических и полупроводниковых датчиков заключается в уменьшении размера чувствительного слоя. Целью является уменьшение объема нагрева состоящего из подложки, нагревателя который сверху и осажденного катализатора. Для реализации этой задачи, технология создания спирального проводного нагревателя (Spiral Wired Heater – как при каталитическом шариковом датчике) [23] переходит в планарный сенсор [26] где нагреватель реализуется как меандр на подложке. В этом случае, толщина подложки должна быть как можно тоньше. Вообще говоря, подложка формируется в мембрану. В тоже время мембрана должна быть крепкой чтобы поддерживать катализатор и высокую температуру. Второй подход на основе мембранной технологии [27] обеспечивает уменьшение площади нагревателя и катализатора. Данный подход помогает оптимизировать энергопотребление но в результате этого происходит деградация отклика датчика. Указанный подход содержит два метода для производства полупроводниковых и каталитических датчиков используя мембранную технологию. Первый основан на тонких диэлектрических мембранах в частности SiO_2/SiNx [28] (микромашинная технология создания кремния).

Производство полупроводниковых и каталитических датчиков с микромашинной технологией на основе кремния - газовые датчики на основе микромашинной технологии похожи между собой в плане конструкции (см. рис. 1.8) [29], [30], [31]. Основным компонентом датчика является мембрана изготовленная из слоев SiO_2/SiNx и содержит Pt нагреватель и наверху мембраны расположены электроды, и катализатор. Полупроводниковый слой в полупроводниковых датчиках изготовлены из SnO_2 , ZnO и других составов с каталитическими примесями на основе благородных металлов. Каталитические датчики имеют диэлектрический опор пропитанный Pt и Pd металлами.



Рис. 1.8. Вид поперечного сечения датчика [29]

Энергопотребление этих датчиков при мониторинге метана варьируется между 30 и 120 мВт в непрерывном режиме измерения [29], [30]. В отличие от электронных устройств которые обычно упаковываются и имеют корпус защищающий их от внешней среды, датчики на основе микромашиной технологии находятся в прямом контакте с окружающей средой и это приводит к ухудшению их параметров. В случае работы датчика в жестковатой среде, деградация происходит быстрее и требуется частое выполнение калибровки.

Самым пригодным материалом для производства элемента нагрева датчика который не окисляется при температуре от 400 – 500 °С (для метана) считается Pt. В тоже время существуют недостатки в его применении.

Основными проблемами связанными с использованием традиционных микромашиных подложек на основе кремния являются недостаточная стабильность и низкое сопротивление усталости многослойной мембраны из оксида кремния/ нитрида кремния, нестабильность нитрида кремния к гидролизу при высоких температурах, плохая адгезия Pt к мембране и плохая адгезия чувствительных слоев к мембране материала. Также трудно ожидать, что для подложек будут характерны хорошая вибрация и ударопрочность.

Датчики на основе керамических мембран (CeraMEMS)- можно было бы избежать ряд проблем, связанных с технологией кремниевой мембраны применяя мембрану из Al₂O₃ полученную при анодном окислении Al в электролите и последующем отжиге, что приводит к формированию почти однородной γ модификации поликристаллического оксида алюминия [32]. γ- Al₂O₃ мембрана будет дальше растянута на жесткой керамической

подложке с заранее просверленными отверстиями (с диаметром 3 мм). Эту технологию можно применять как для каталитических так и для полупроводниковых датчиков. Потребление мощности указанных микронагревательных плит равно примерно 50-70 мВт за каждый датчик.

Структура CeraMEMS чип иллюстрирована на рис. 1.9 [32]. Она содержит жесткую раму созданную из коммерческой алюминиевой керамики Rubalit 710TM (Rubalit 710TM Alumina Ceramics) (1) с отверстиями; тонкая пленка алюминия (3) фиксирована на этой раме стеклянным связующим (Glass Binder) (2) и покрывает отверстие которое было просверлено лазером. Сверху этой пленки находится измерительный слой (4) оборудованный нагревателем в форме меандра (6) и Digit Electrode был осажден трафаретной печатью или методом осаждения капли (Drop Deposition). Контактные площадки для измерительного слоя и нагревателя показаны в (7).

Технология производства микронагревательных плит не требует комплексные и дорогие оборудования. Однако значение требуемой мощности еще высоко из за утечки

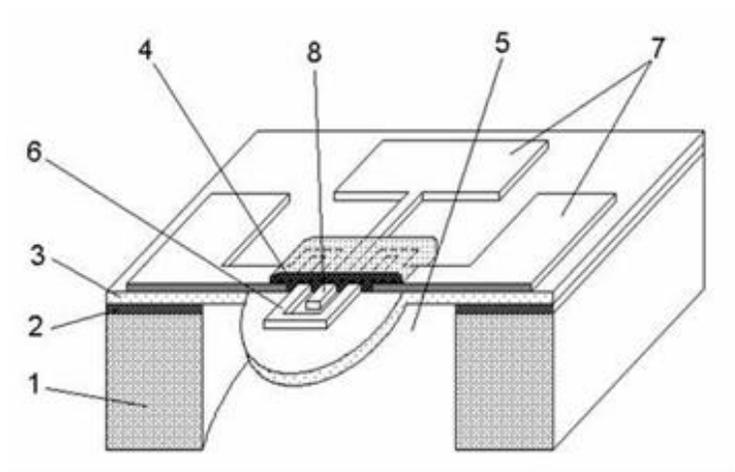


Рис. 1.9. Схема CeraMEMS чип на основе тонкой пленки алюминия проектируемой для задач по обнаружению газов. Керамическая подложка толщиной 1 – 0,6 мм в отверстиями; 2 – Слой стеклянне связующего 3- Тонкая алюминиевая пленка изготовленная “electrolyte spark” окислением алюминия 4- Слой измерения газа 5- отверстия просверленные лазером 6 – платиновый нагреватель в форме меандра 7 - Контактные площадки для нагревателя и ‘Digit Electrode’ 8- Digit Electrode для измерительного слоя (данные из [32])

нагрева вдоль мембраны в керамическую подложку. Кроме того, мембрана изгибается из за теплового расширения при нагревании, что может привести к ее неисправности.

Чтобы решить эту проблему, можно применять свободную мембрану клиновидной формы или мембрану которая только частично присоединена к жесткой керамической раме. В качестве опор датчика, используются нанопористые гамма алюминиевые мембраны толщиной 30 мкм изготовленные анодным окислением Al фольги [27].

Образцы микронагревателей сформированы литофрагией на верхней части мембраны. Микронагреватели осаждены магнетронным распылением платиновой мишени и покрыты тонкой пленкой слоя Al_2O_3 чтобы предотвращать ее деградацию. Нагретая площадь равна примерно 200×200 мкм².

Чтобы избежать изгиб мембраны в течение периодического осуществления процесса нагрева (который в конечном итоге приводит к неисправности мембраны) и в дальнейшем уменьшить энергопотребление, работа предложенная в [27] использует свободную мембрану клиновидной формы без ее соединения к жесткой алюминиевой раме.

Необходимо отметить, что в настоящее время, уменьшаются технологические препятствия в снижении размера чувствительных элементов использованных в каталитических и полупроводниковых датчиках. На самом деле, не существуют технологические препятствия в уменьшении физического размера чувствительного элемента. Проблема заключается в том, что так называемое снижение размеров, в частности для каталитических датчиков приводит к уменьшению объема катализатора и следовательно уменьшению каталитических активных центров. В результате этого снижается время отклика датчика и ускоряется его деградация.

В работе [33] разработан перспективный подход для уменьшения энергопотребления датчика. Авторы предлагают экономить мощность путем снижения рассеяния температуры посредством упаковывания сенсора. Они исследовали эту возможность введением гидрофобного SiO₂ аэрогеля в качестве упаковываемого материала благодаря его отличной теплопроводности и высокой газопроницаемости. Экспериментальные результаты показывают, что можно одновременно добиться существенного снижения в энергопотреблении и высокой селективности для традиционного активного пеллисторного датчика метана оснащенного теплоизоляционной-укрепленной упаковкой использующей SiO₂ аэрогель. Потребление мощности датчика при температуре 450 °C составляет 60 мВт.

Другим способом снижения энергопотребления является уменьшение рабочей температуры ($450\text{ }^{\circ}\text{C}$) датчика конструкцией катализатора [34]. Уменьшение рабочей температуры оказывает сложный эффект на параметры датчика и приводит к непредсказуемым результатам в плане работы датчика. При более низкой рабочей температуре, чувствительность датчика, время отклика, время работы датчика подлежат деградации. Более подробную информацию о MEMS датчиках можно найти в [35].

Энергопотребление инфракрасных датчиков газа на основе NDIR технологии - источник инфракрасного излучения применяемый в датчиках такого типа имеет высокое энергопотребление (и это например составляет примерно 500 мВт и даже больше) [36]. В работе [36] разработан КМОП излучатель инфракрасного излучения на основе вольфрама нагревателя. Поскольку вольфрам считается стабильным элементом при больших температурах ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$) тогда его применение приводит к тому чтобы источник инфракрасного излучения достиг высоких температур и в результате этого распространяется большее количества инфракрасного излучения. Авторы применяли КМОП на основе технологии кремний на изоляторе для формирования нагревателя, диодного датчика и n канального МОП транзистора. В указанной работе, мембрана формировалась с помощью метода сухого травления (DRIE Back-Etch Step) который изолирует нагреватель от остальных блоков схемы что уменьшает энергопотребление. Результаты измерений показывают, что потребляемая мощность источника инфракрасного излучения для его нагрева до температуры $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 70 мВт. Когда источник

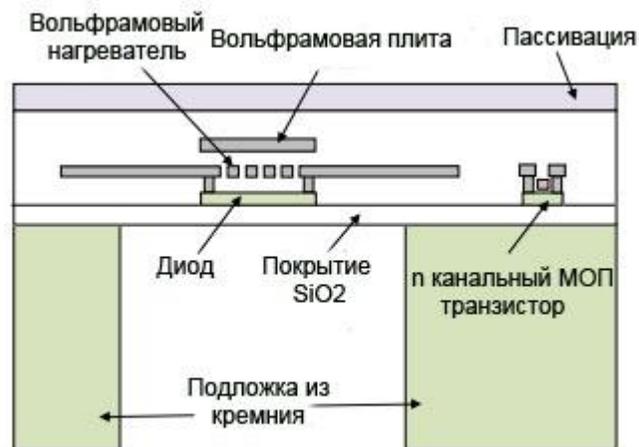


Рис. 1.10. Структура излучателя разработанного в [36].

излучения работает при частоте 10 Гц и температуре 600 °С средняя потребляемая мощность будет 40 мВт. Рисунок 1.10 показывает структуру излучателя разработанного в [36].

В работе предложенной в [37], авторы разработали датчик CO₂ на основе NDIR технологии. В качестве излучателя применяется светодиод. Также предназначен фотодиод для детектирования приходящего излучения. Авторы использовали III-V AlGaInAsSb с узкой запрещенной зоной как полупроводниковый материал для светодиода и фотодиода. По мнению авторов поскольку у указанного полупроводникового материала существуют разные композиции с идентичными запрещенными зонами можно будет регулировать излучение источника путем изменения композиции.

Потребление мощности датчика составляет 3,5 мВт и 0,07 мВт при непрерывном и малоэнергопотребляющем режимах измерения.

Энергопотребление электрохимических датчиков - электрохимические датчики газа потребляют малое количество энергии. Однако в этом разделе описан пример датчиков такого типа. В работе [38] разработана многосенсорная платформа по обнаружению разных газов. Авторы предложили два подхода для уменьшения энергопотребления платформы. Первый подход основан на совместном использовании аппаратных компонентов и второй заключается в миниютиризации электродов датчика (применение процесса микротехнологии) вследствие чего потребляемая мощность каждого датчика составляла меньше чем 3,2 мкВт.

1.5.Альтернативные источники энергии как новые платформы питания беспроводных газовых датчиков

Мониторинг горючих газов является важной задачей как в жилых так и в промышленных зонах. Газовые датчики питаются от кабелей или батарей. Проведение кабельных линий для питания датчиков в некоторых задачах например когда сеть состоит из огромного количества сенсоров является сложной процедурой. Несмотря на то, что применение батарей устраняет указанную сложность, они имеют конечное время работы и в тоже время необходимо отметить, что датчики горючих газов потребляют значительное количество мощностей [39], [40].

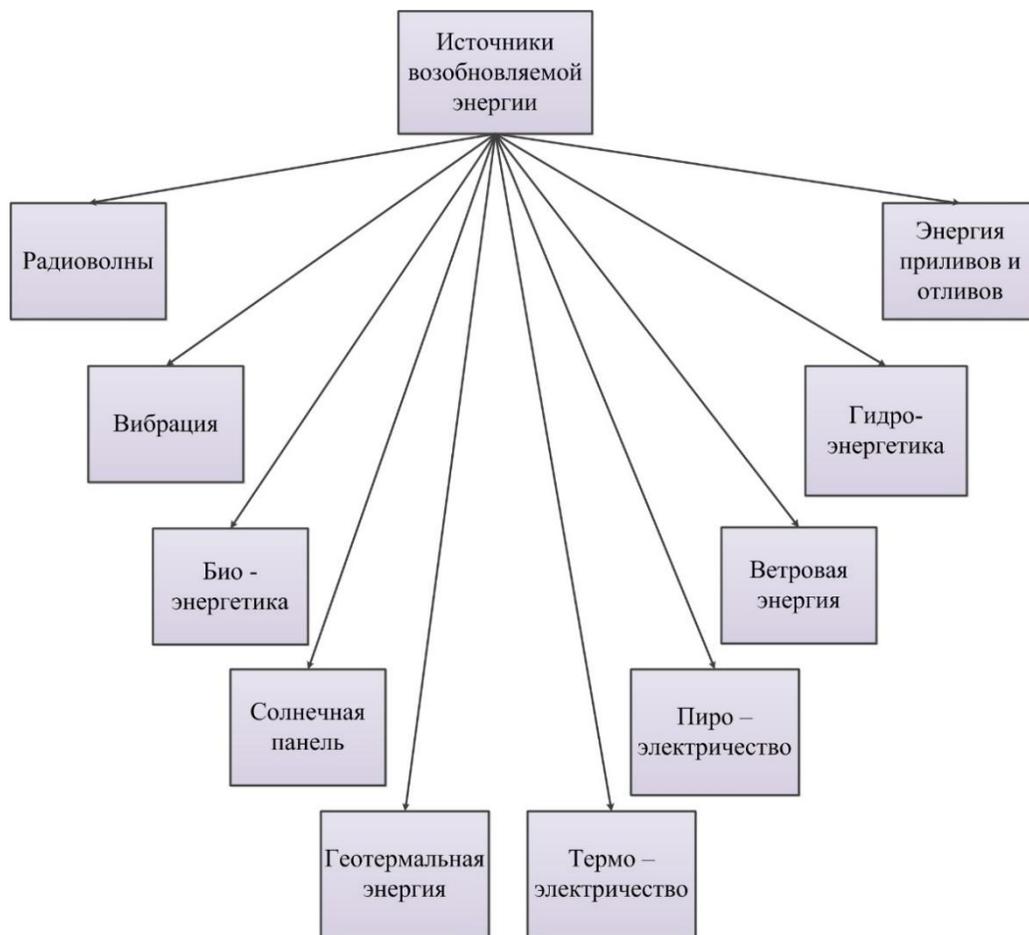


Рис. 1.11 Виды возобновляемых источников энергии

Таблица 1.1 Перечень источников энергии способных для применения в беспроводных сенсорных сетях [16], [41], [42], [43]

Источник	Условия	Плотность мощности
Солнечная энергия	На открытом воздухе	0,1 Вт/ см ²
Солнечная энергия	В закрытом помещении	10 ⁻⁴ Вт / см ²
Вибрация	1м/с ²	10 ⁻⁴ Вт / см ³
Радиоволны	WiFi	10 ⁻⁹ Вт / см ²
Радиоволны	GSM	10 ⁻⁷ Вт / см ²
Термоэлектричество	$\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$	6·10 ⁻⁵ Вт / см ²
Пироэлектричество	Скорость изменения температуры: 8,5 °C/с	8,64·10 ⁻⁶ Вт/ см ²
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 ²)

В большой сенсорной сети процедура замены батарей может отнимать массу времени и в результате этого отслеживаемый процесс может останавливаться. Более того, если беспроводные газовые датчики расположены в местах которые характерны неблагоприятными климатическими и географическими условиями, то соответствующая процедура усложняется. Поэтому управление мощностью для беспроводных газовых датчиков имеет существенную роль. Методы которые были рассмотрены в предыдущем разделе считаются одним аспектом в отношении уменьшения энергопотребления датчиков. Другой возможностью является использование альтернативных источников энергии [44], [45], [46]. Рисунок 1.11 демонстрирует перечень возобновляемых источников энергии. На рисунке можно видеть, что источниками возобновляемой энергии являются Солнце, ветер, вода, приливы и отливы, геотермальная энергия, биоэнергетика, вибрация, радиоволны, термоэлектричество и пироэлектричество. Перечень некоторых из источников энергии в природе которые можно применять для питания беспроводных датчиков представлен в таблице 1.1. В следующем разделе приведено описание методов сбора энергии.

1.5.1. Солнечная энергия

Фотовольтаика является технологией, которая генерирует постоянный ток от полупроводников при освещении их фотонами. В таблице 1.4 можно видеть, что солнечная энергия обладает большей долей в плане обеспечения мощности. Пример использования солнечных панелей можно найти в [47] где беспроводная сенсорная сеть предназначена для мониторинга водной среды. На самом деле применение солнечных панелей в такой задаче считается логичным поскольку батареи имеют ограниченный срок службы и проводить кабель в этом случае может оказаться сложной процедурой.

Рисунок 1.12 показывает зависимости мощности и тока солнечной панели от напряжения. Солнечные панели имеют пик мощности при определенном значении напряжения и тока. Поэтому разработаны алгоритмы нахождения этой оптимальной точки и известны под названием Maximum Power Point Tracking. Для реализации данного метода применяется DC-DC преобразователь и контроллер в котором запрограммирована логика нахождения.

В работах [47], [48] и [49] можно видеть решения которые стремятся обеспечить оптимальную точку солнечной панели для беспроводных сенсорных сетей.

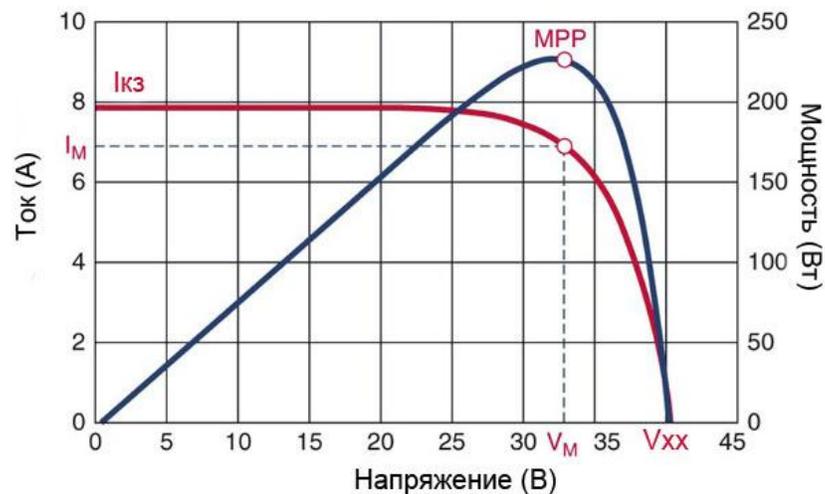


Рис. 1.12 Зависимость мощности и тока от напряжения. Точка максимальной мощности соответствует определенному значению тока (I_M) и напряжения (V_M) [50].

1.5.2. Пьезоэлектричество

Слова “Пьезоэлектричество” состоит из двух частей: пьезо (которое на греческом языке означает давление) и электричество. Пьезоэлектрические материалы генерируют электричество когда на их поверхности действует механическая сила и это явление называется прямым пьезоэлектрическим эффектом. Также существует явление обратного пьезоэлектрического эффекта, т.е., когда под действием электрического поля возникает механическая деформация. Прямой пьезоэлектрический эффект может применяться в измерительных задачах; пьезоэлектрический акселерометр является одним примером использования этих материалов в указанных задачах. Обратный пьезоэлектрический эффект находит применение в задачах связанных с исполнительными устройствами. В качестве примера можно привести пьезоэлектрические двигатели.

Некоторыми материалами которые обладают свойством пьезоэлектричества являются, например, кварц, мягкий и твердый цирконата-титаната свинца (PZT-5H and PZT5A), титаната бария ($BaTiO_3$), поливинилиденфторида (PVDF) и другие. Пьезоэлектрические материалы обеспечивают значительное количество напряжения. Однако они не являются удобными вариантами когда для генерирования напряжения используются статические силы.

В работе [51] разработана кантилеверная энергоустановка сбора энергии на основе ZnO используя PET подложку. Энергоустановка состоит из четырех блоков ZnO. Каждый блок имеет свою резонансную частоту и поэтому частоты которые были приложены для создания деформации отличались между блоками. В результате эксперимента максимальное напряжение холостого хода достигала 4 В при частоте 146 Гц. Поскольку энергоустановка может генерировать электричество при разных частотах то авторы ее называют широкополосной. Из за того, что вибрации в природе имеют разные частоты, нужно разработать систему таким образом чтобы она могла бы собирать энергию при разных частотах. Вибрации в природе могут распространяться по разным осям. В работе представленной в [52], авторы разработали платформу которая может собирать энергию от механических колебаний по двум осям: y и z . Энергоустановка состоит из двух кантилеверов. Один кантилевер направлен в сторону оси y а другой по оси z . На вершине

каждого кантилевера расположен постоянный магнит у которых одноименные поля направлены друг к другу чтобы создавать отталкивающую силу. Вибрации возникающие в одном кантилевере передаются другому кантилеверу благодаря указанному расположению магнитов. Максимальная мощность в работе для каждого кантилевера при нагрузке 330 кОм была примерно равна 5,6 мкВт.

1.5.3. Тепловая энергия

Другим источником энергии который можно перерабатывать в электричество является тепловая энергия. В качестве устройства выполняющего указанное преобразование можно применять термоэлектрический генератор. Термоэлектрические генераторы преобразуют тепловую энергию в электрическую. Явление по которому термоэлектрические генераторы вырабатывают электричество известно под названием “Эффект Зеебека”. Генерируемое напряжение и мощности при таком методе, зависят от разности температуры и также от коэффициента Зеебека термоэлектрических материалов. Генератор состоит из массива полупроводниковых элементов р и n типов. Полупроводниковые элементы подключены таким образом, чтобы создавалось последовательное электрическое соединение и параллельное “тепловое соединение”. Верхняя и нижняя части модуля покрыты оксидом алюминия чтобы формировать электрическую изоляцию и в тоже время создавать теплопроводность. Рисунок 1.13 показывает структуру термоэлектрического генератора.

В работе [53], авторы разработали платформу которая обеспечивает питание беспроводного датчика с помощью термоэлектрического генератора, собирающего тепловую энергию за счет изменения температуры обшивки самолета. Одна сторона термоэлектрического генератора прикреплена к фюзеляжу и другая сторона привязанна к блоку содержащему материал с изменяемым фазовым состоянием в случае которого

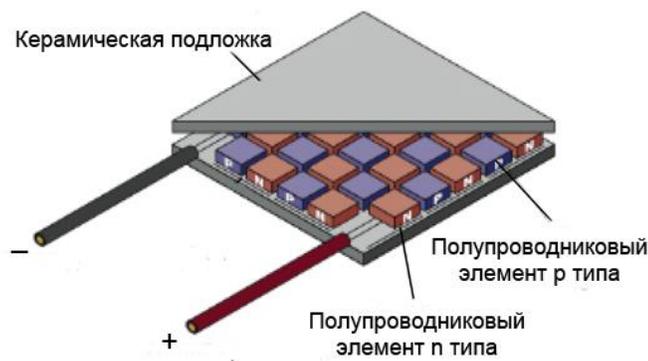


Рис. 1.13 Термоэлектрический генератор [54]



Рис. 1.14 Энергоустановка разработанная в [55] которая создает электрическую энергию за счет изменения температуры.

применина вода. Указанный блок используется для того, чтобы повысить разницу температуры.

В плане области применения термоэлектрических генераторов можно привести пример представленный в [55] (рис. 1.14) в котором термоэлектрические генераторы формируют структуру в виде ремни. Практическую значимость указанной структуры можно видеть в трубопроводных сетях когда беспроводные газовые датчики развертываются для мониторинга утечки газа и электрическая энергия генерируется из за разности температуры труб и окружающей среды.

1.5.4. Радиоволны

Сегодня с бурным ростом применения радиосистем развивается также возможность аккумулирования энергии от радиоволн. При сборе энергии от радиоизлучения нужно отметить, что в соответствии с уравнением Фрииса, отношение мощности на приемной антенне к мощности на передающей антенне прямо пропорционально зависит от коэффициентов усиления обеих антенн, а также квадрата длины волн и обратно пропорционально зависит от квадрата расстояния между источником излучения и приемником. Использование этого типа сбора энергии не привязано к временным условиям суток

Пример сбора энергии на основе радиоизлучения можно найти в [56]. В указанной работе разработана плата которая может собирать энергию дециметровых волн. Плата была расположена в 6,5 км от источника излучения и полученная мощность при частоте 550 МГц составляет примерно 65 мкВт.

1.5.5. Ветровая энергия

Ветровая энергия является одним из распространенных источников генерирования электричества в системах энергоснабжения [57]. Однако, применение ветровой энергии не ограничивается крупными шкалами и можно ее тоже использовать в микромасштабах, например для питания беспроводных сенсорных сетей [15], [16], [58].

В качестве примера применения ветровой энергии для беспроводных сенсорных сетей, можно привести работу в [16] где авторы разработали плату аккумулирующую энергию ветра и Солнца. В работе был использован ветрогенератор диаметром 6,3 см и выходная электрическая мощность при скоростях ветра 2,3, 4,2 и 4,4 м/с соответствовала 3, 5,3 и 7,8 мВт. В работе [58], был проведен эксперимент чтобы исследовать возможности применения ветровой энергии для питания беспроводных датчиков предназначенных для мониторинга состояния моста. Авторы рассмотрели ветроколеса с 2-мя, 3-мя и 6-мя числами пропеллеров в диапазоне ветров от 3,5 до 7 м/с с целью нахождения той конфигурации при которой можно было достигнуть максимальной электрической мощности. В результате эксперимента был выбран ветроколесо с 6-мя пропеллерами поскольку оно генерировало максимальное количество мощности в случае которого было 438.70 мВт. Для зарядки аккумулятора потребовалась 33 мин, что было примерно на 15 мин дальше по сравнению с теоретическим расчетом. Это объясняется тем, что сбор энергии ветра не осуществляется оптимальным образом поскольку мощность выдаваемая ветрогенератором зависит от нагрузки [16], [44]. Чтобы решить эту проблему можно будет разработать алгоритм нахождения точки максимума мощности ветрогенератора (Maximum Power Point Tracking) чтобы балансировать нагрузку.

1.6 Выводы

- Беспроводные сенсорные сети открыли новую платформу исследований в инженерных задачах. Простота развертывания позволяет расширить их спектр применения.
- Одной из областей где беспроводные датчики могут применяться считается задача по обнаружению концентрации газов. Когда беспроводные сенсорные сети используются для мониторинга горючих газов нужно учитывать, что датчики данного типа потребляют значительное количество мощностей и с другой стороны в качестве питания беспроводных сенсорных сетей обычно используются батареи. Замена батарей в сетях содержащих огромное количество датчиков отнимает массу времени и результате чего отслеживаемый процесс может останавливаться. Эта проблема усложняется когда промышленные процессы над которыми должны осуществляться мониторинг, находятся в суровых условиях. Поэтому задача оптимизации энергопотребления беспроводных датчиков по обнаружению горючих газов имеет важное место.
- В окружающей среде существуют разные виды энергии которые в зависимости от источника, доступны в разных количествах. Чтобы увеличить время автономной работы датчиков газа, можно применять технологию сбора энергии от альтернативных источников энергии.
- В результате анализа альтернативных источников энергии, можно делать вывод, что солнечная и ветровая энергии обеспечивают большее количество плотности мощности.
- В зависимости от количества выдаваемой энергии и используемого датчика газа, альтернативные источники энергии могут работать как основной или дополнительный источник питания.
- Поскольку альтернативные источники энергии не постоянны во времени, разработка гибридных моделей, т.е, платформы которые собирают энергию от более одного источника в одно и тоже время может увеличить вероятность непрерывной работы датчика.

- Применение технологии альтернативных источников энергии вместе с методами оптимизации энергопотребления указанными в этой главе позволяет стремиться к созданию концепции “Автономные беспроводные датчики газа”.

ГЛАВА 2. Теоретические основы создания платформы питания беспроводных газовых датчиков от возобновляемых источников энергии

2.1. Оценка потребления мощности беспроводными датчиками газа

В данной главе, рассматриваются теоретические основы создания энергоустановки которая может одновременно собирать энергию от более одного альтернативного источника энергии. Перед тем как разработать теоретическую концепцию для создания энергоустановки необходимо проводить оценку потребления мощности беспроводными датчиками газа.

Таблица 2.1- Потребление тока датчиками газа

ТИП ДАТЧИКА	ФИРМА	Ток	Напряжение (В)
NAP-505 Электрохимический датчик угарного газа	Nemoto	5 мкА	2~3
DTK-2 Каталитический датчик метана	NTC-IGD, Россия	55 мА	2,8
SGS-21XX Полупроводниковый датчик водорода, метана, пропана, гексана и суммы углеводородов, окиси углерода и суммы углеводородов в воздухе	Delta, Россия	66,5 мА	2
TGS2610 Полупроводниковый датчик сжиженных углеводородных газов и их компонентов (например, пропан и бутан)	FIGARO, Япония	93,3 мА	Для нагревателя: 5,0±0,2 В DC/AC Для схемы: 5,0±0,2В DC/AC
NAP-66А Каталитический датчик пропана, бутана, паров бензина и сжиженных углеводородных газов	Nemoto, Япония	120 мА	2,0 В +/- 0,2 В
MQ-4 Полупроводниковый датчик природного газа и метана	Hanwei Electronics, Китай	250 мА	Для нагревателя: 5,0±0,1 В DC/AC Для схемы: 5,0±0,1В DC/AC
Инфракрасный датчик для мониторинга НКПР газов и паров содержащих горючие углеродные компоненты	Платформа представлена в (Makeenkov, A., Lapitskiy, I., Somov, A., Baranov, A, 2015)	Ток потребления датчика :125 мА, Ток источника излучения: 115 мА при 100% модуляции рабочего цикла	Напряжение питания датчика: 5 ± 0,2 В Напряжение питания источника излучения: 5 В

Таблица 2.2- Потребляемый ток нынешних передатчиков Zigbee

Модель передатчика	Фирма	Расход тока (мА)	Диапазон напряжений (В)
CC2500	Texas Instruments	Тх: 21,2 мА @ 0 дБм Rx: 13,3 мА	1,8...3,6
ETRX35x	Telegesis	Тх: 31 мА @ +3 дБм, Rx: 25 мА @ 12 МГц тактовая частота	2,1...3,6
TR1000	RF Monolithics	Тх: 12 мА @ 0 дБм, Rx: 4,5 мА	2,2...3,7
JN5148-001-M00/03	Jennic	Тх: 15 мА @ +2,5 дБм, Rx: 17,5 мА	2,3...3,6

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

Поэтому был проведен анализ энергопотребления основных компонентов беспроводных газовых датчиков (табл. 2.1-2.3).

Потребление энергии другими элементами электрической схемы можно на данном этапе не учитывать. Анализ энергопотребления представлен в таблицах 2.1-2.3. Потребление приемопередатчика и МК зависит от режимов их работы и может изменяться на несколько порядков. Например, передатчик ETRX35x (таблица 2.3) потребляет примерно 1 мкА в спящем режиме а в активном режиме имеет энергопотребление 31 мА при +3 дБм.

Видно, что сенсоры газов, такие как каталитические, полупроводниковые и инфракрасные потребляют значительное количество энергии по сравнению с другими компонентами беспроводного датчика (таблицы 2.1, 2.2 и 2.3).

Таблица 2.3 - Потребляемый ток нынешних микроконтроллеров

Модель микроконтроллера	Фирма	Расход тока (мА)	Диапазон напряжений (В)
MSP430F247 Микроконтроллер	Texas Instruments	Активный режим: 321 мкА @ 3,3 В / 1 МГц Низкопотребляющий режим: 1 мкА @ 3В / 32768 Гц	1,8...3,6
ATmega168P Микроконтроллер	Atmel	Активный режим: 1,8 мА @ 3 В / 4 МГц Энергосберегающий режим: 0,9 мкА @ 3 В / 32 кГц	2,7...5,5
ATxmega32A4 Микроконтроллер	Atmel	Активный режим: 1,1 мА @ 3 В / 2 МГц Энергосберегающий режим: 0,7 мкА @ 3 В / 32 кГц	1,6...3,6
ADuC824 Микроконтроллер	Analog Devices	Активный режим: 3 мА @ 3 В / 1,5 МГц Энергоэффективный режим: 20 мкА @ 3 В / 32 кГц	3 и 5

В тоже время электрохимический датчик практически не потребляет энергии. Исходя из таблицы 2.3 можно делать вывод, что микроконтроллер имеет наименьшее энергопотребление среди остальных компонентов беспроводного газового датчика.

Также был проведен расчет времени автономной работы датчиков на основе батарей емкостями 3000, 8000 и 15000 мАч (таблица 2.4). Согласно таблице 5, максимальная потребляемая мощность беспроводного газового датчика составляет 261 мВт при напряжении 3 В, поэтому энергоустановка по акумулированию энергии должна обеспечить указанную мощность для работы беспроводного газового датчика.

Таблица 2.4 – Расчет энергопотребления и времени работы беспроводных датчиков CO и CH4

Тип датчика	Мощность датчика		Мощность микроконтроллер ATmega32A4		Мощность передатчика ETRX35x		Суммарная потребляемая мощность (мВт)	
	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим
Электрохимический датчик NAP-505	0	15(мкВт)	2 (мкВт)	3,3 (мВт)	3 (мкВт)	93 (мВт)	5(мкВт)	94,3 мВт
Тип элемента				Время автономной работы беспроводного датчика				
				Активный режим		Спящий режим		Общее время работы
AA, 1,5 В, 3000 мАч				48 ч		9000000 ч		9000048 ч
C, 1,5 В, 8000 мАч				127 ч		2400000 ч		2400127 ч
D, 1,5 В, 15000 мАч				239 ч		4500000 ч		4500239 ч
Тип датчика	Мощность датчика		Мощность микроконтроллер ATmega32A4		Мощность передатчика ETRX35x		Суммарная потребляемая мощность (мВт)	
	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим	Спящ. режим	Актив. режим
Каталитический датчик ДТК-2	0	165 (мВт)	2 (мкВт)	3,3 (мВт)	3(мкВт)	93(мВт)	5(мкВт)	~261мВт
Тип элемента				Время автономной работы беспроводного датчика				
				Активный режим		Спящий режим		Общее время работы
AA, 1,5 В, 3000 мАч				17 ч		900000ч		900017 ч
C, 1,5 В, 8000 мАч				46 ч		2400000 ч		2400046 ч
D, 1,5 В, 15000 мАч				86 ч		4500000ч		4500086 ч

Исходя из таблиц 1.1 и 2.4, данные параметры могут быть обеспечены только за счет достаточно мощных источников альтернативной энергии, а именно, Солнца и ветра.

2.2. Общие понятия для создания энергоустановки по аккумулярованию энергии из окружающей среды

На основе платформы сбора энергии могут лежать блоки накопления энергии, мониторинга мощности, выбора источника питания и блока обеспечивающего необходимый уровень питания для сенсорного модуля (т.е, датчик, микроконтроллер и передатчик). Рисунок 2.1 показывает элементы платформы аккумулярования энергии.

Беспроводной газовой датчик проводит измерения только в определенное время (например раз в минуту). В тоже время нужно учитывать, что энергия от альтернативных источников энергии меняется во времени. Поэтому необходимо непрерывно накапливать энергию из окружающей среды. Для реализации этого, в платформе можно применять схему содержащую накопительные элементы такие как аккумуляторы или конденсаторы. 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 тоже время 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. 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.

Блок схема предложенной энергоустановки представлена на рисунке 2.1. Таким образом, энергоустановка должна состоять из следующих частей: входной блок, включающий себя литиевый элемент и альтернативные источники питания (солнечная батарея, ветрогенератор и др.), блок коммутации и хранения энергии, блок мониторинга мощности и выбора источника питания и преобразователь напряжения.

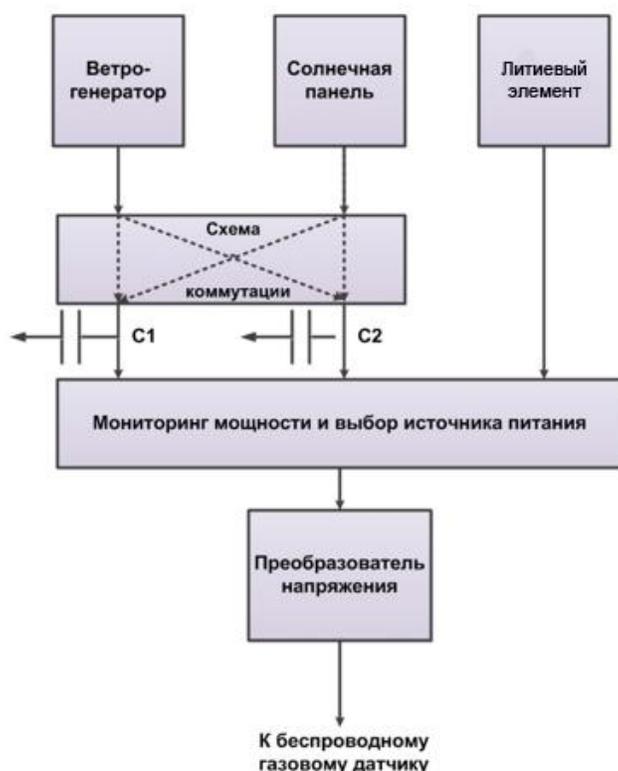


Рис.2.1 Блок схема энергоустановки по аккумулярованию энергии от возобновляемых источников энергии

Функцией блока мониторинга мощности является отслеживание уровня напряжения на накопительных элементах и резервном источнике питания и выбора источника питания. Чтобы обеспечить уровень питания необходимый для работы сенсорного модуля и накопительного устройства нужно использовать блок регулирования мощности.

Разработку платформы аккумулярования энергии можно осуществлять так чтобы она могла бы работать с любым устройством сбора энергии [59]. При такой форме проектирования, расширяется гибкость и функциональность системы а с другой стороны увеличивается сложность платформы. Причина заключается в том, что одни устройства сбора энергии могут генерировать постоянное напряжение как солнечная панель а другие выдают переменное как энергия радиоволн. Поэтому необходимо применять разные блоки

регулирования мощности. В качестве примера блока регулирования мощности можно привести DC/DC преобразователе.

Количество собираемой мощности зависит от окружающей среды, устройства сбора энергии, эффективности блока регулирования мощности и применения алгоритмов оптимизации сбора энергии.

2.3 Линейные регуляторы

Как раньше было указано, некоторые виды альтернативных источников энергии генерируют постоянное напряжение. Для обеспечения необходимого уровня постоянного напряжения, в платформах сбора энергии применяют DC/DC преобразователи. Выбор преобразователя напряжения зависит от формы выходного сигнала аппарата сбора энергии (т.е, он может быть AC или DC), рабочего напряжения накопительного устройства и сенсорного модуля. Для питания беспроводного датчика газа можно использовать линейные регуляторы или импульсные преобразователи [60] (рис. 2.2).

На рисунке 2.3 можно видеть структуру линейного регулятора. Его базовая схема содержит усилитель рассогласования (УР) и проходной транзистор который работает как источник тока, управляемый напряжением. Усилитель рассогласования непрерывно отслеживает выходное напряжение и сравнивает его значение с эталонным напряжением. На основе уровня сигнала рассогласования, выходное напряжение которое подается на нагрузку корректируется.

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. Например если необходимо чтобы источник напряжения 9 В обеспечил питание нагрузки на уровне 3 В тогда максимальная эффективность составляет 36,67%.

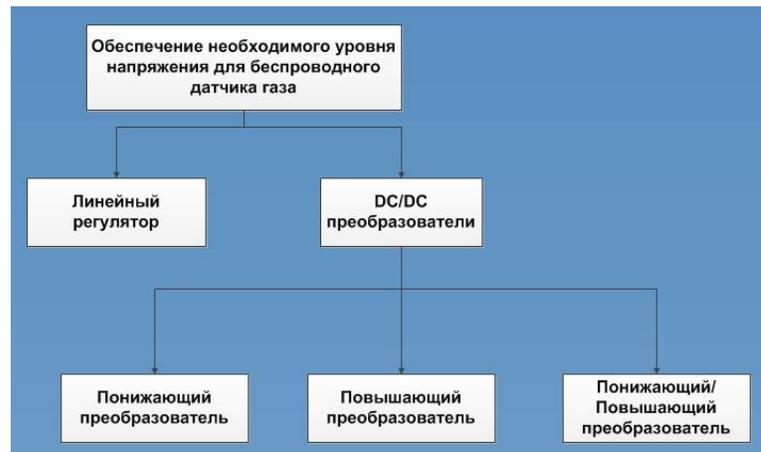


Рис. 2.2. Возможные варианты обеспечения необходимого уровня напряжения для беспроводного датчика газа

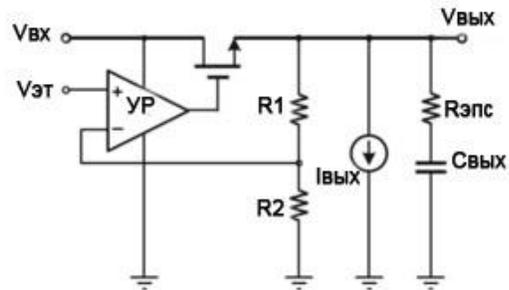


Рис. 2.3. Линейный регулятор [61]

Однако если применять источник напряжения 4,5 В эффективность увеличивается до 73,3 %. Импульсные преобразователи обладают высокими КПД. Они работают путем включения и выключения напряжения поступающего на нагрузку.

2.4 Ключевые стабилизаторы напряжения

Эти преобразователи состоят из контроллера с обратной связью и модуля энергии. Модуль энергии содержит ключи, индуктивный элемент и конденсатор.

Напряжение на выходе импульсных конвертеров повышается или понижается. Чтобы регулировать необходимый уровень выходного напряжения в соответствии с напряжением сравнения контроллер интегрированный в схему этих преобразователей отслеживает блок энергии. Контроллер с обратной связью определяет рабочий цикл модуля энергии и применяет широтно импульсную модуляцию.

В некоторых преобразователях контроллеры регулируют выходное напряжение когда происходит флуктуация входного напряжения [61]; явление которое и наблюдается при аккумуляции энергии от альтернативных источников энергии.

Как показано на рис. 2.4 схема понижающего конвертера состоит из источника питания V_g , ключ S , диода D и фильтр содержащий индуктивный элемент L и конденсатор C . Выходное напряжение ключа $V_s(t)$ равно V_g когда ключ находится в положении 1 и оно равняется нулю когда ключ находится в положении 2. Положение ключа меняется периодически таким образом, что $V_s(t)$ будет иметь прямоугольную форму с периодом T_s и рабочим циклом D . Рабочий цикл соответствует времени когда ключ находится в положении 1 и $0 \leq D \leq 1$. Частота переключения f_s соответствует $1/T_s$. На практике ключ реализуется полупроводниковыми устройствами как диоды МОП транзисторы, биполярные транзисторы с изолированным затвором (БИТЗ), биполярные транзисторы или тиристоры. Типичные частоты переключения лежат в интервале от 1 кГц до 1МГц в зависимости от типа полупроводникового устройства. Ключ меняет постоянное напряжение и используя преобразование Фурье, постоянное напряжение формы волны задается его средним значением. Уравнение 2.1 показывает среднее значение напряжения $V_s(t)$.

$$V_s = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T_s} v_s(t) dt = D \cdot V_g \quad (2.1)$$

Из уравнения 1 можно видеть, что ключ уменьшает постоянное напряжение фактором D который является рабочим циклом. Это связано с тем, что $0 \leq D \leq 1$. Идеальным образом, рассеиваемая мощность на ключе равна нулю.

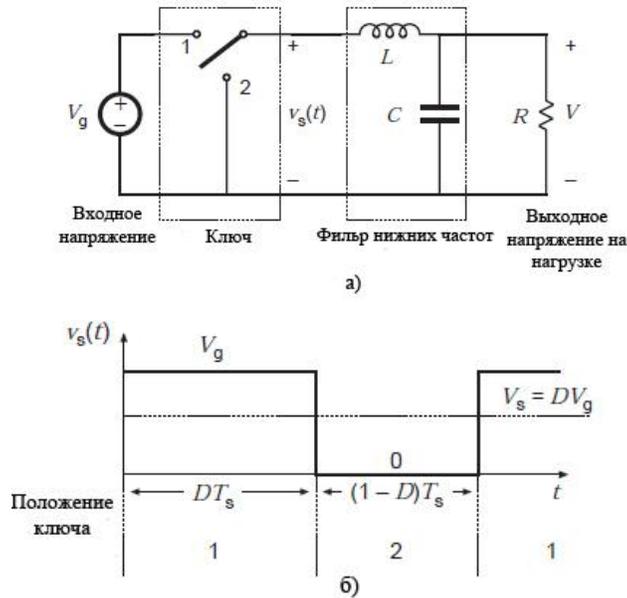


Рис. 2.4. а) Схема понижающего преобразователя содержит ключ уменьшающий уровень постоянного напряжения и фильтр нижних частот для вынесения высоко частотных гармоник полученных из процесса переключения б) Переключение сигнала напряжения [62]

Когда контакты ключа замкнуты, существует нулевое напряжение на контактах и поэтому рассеиваемая мощность равняется нулю. Когда контакты разомкнуты не будет протекать ток и рассеиваемая мощность в этом случае тоже будет нулю. Поэтому идеальный ключ может изменять постоянное напряжение без рассеивания мощности.

Необходимо отметить, что форма волны v_s генерируемая ключом содержит гармоники. В большинстве задач, эти гармоники нужно вынести чтобы выходное напряжение $v(t)$ было равным $V = V_s$. Для этого используется фильтр низких частот. Схема представленная на рис. 18 содержит индуктивный элемент L и конденсатор C которые образуют указанный фильтр. Частота среза фильтра выражается уравнением 2.2.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

Частота среза f_0 выбирается так, чтобы она была достаточно ниже частоты переключения f_s . Причина заключается в том, чтобы фильтр пропускал только постоянные

состояющие $V_s(t)$. Как и в случае ключа, в идеальной конфигурации, мощность не рассеивается на фильтре.

Коэффициент преобразования $M(D)$ определяется как отношение выходного постоянного напряжения V к входному напряжению V_g в стационарных условиях:

$$M(D) = \frac{V}{V_g} \quad (2.3)$$

Для понижающего преобразователя $M(D)$ определяется:

$$M(D) = D \quad (2.4)$$

График уравнения 2.4 продемонстрирован на рис. 2.5. Из графика следует, что значение выходного постоянного напряжения V задается в интервале от 0 до V_g путем изменения рабочего цикла D .

В зависимости от тока индуктивного элемента L , преобразователь может работать в двух режимах. Первый режим называется непрерывной проводимостью и второй прерывистой проводимостью. Преобразователь работает в непрерывном режиме проводимости когда ток по индуктивному элементу не достигает нуля (например, i_L является положительным). Преобразователь переходит в прерывистой режим если ток индуктивного элемента достигает нуля и будет меняться на некоторое время. Граница между режимами непрерывной и прерывистой проводимости известна как режим критической непрерывной проводимости или критической прерывистой проводимости.

Режим непрерывной проводимости начинается когда ключ замкнут. В этом случае предполагается, что ток индуктивного элемента имеет некоторую величину. Когда ключ включен, отрицательное напряжение возникает на диоде и он будет выключаться. Поэтому

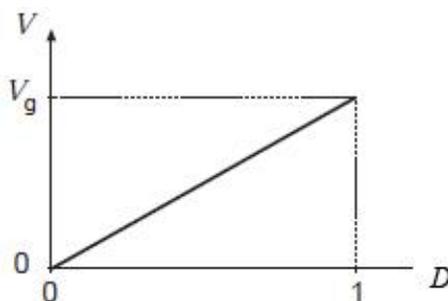


Рис. 2.5. Выходное напряжение понижающего преобразователя V в зависимости от рабочего цикла D [62]

ток течет по индуктивному элементу. Ток на L линейно увеличивается или другими словами индуктивный элемент заряжается на этом суб - интервале.

Этот интервал закончивается когда ключ выключается. В этом случае диод будет проводить ток и ток индуктивного элемента начинает уменьшаться на этом суб - интервале. Поскольку преобразователь работает в режиме непрерывной проводимости, нужно ключ включить чтобы ток индуктивного элемента не достиг нуля. Как только ключ замыкается ток на индуктивном элементе начинает увеличиваться и этот цикл повторяется.

Когда преобразователь находится в режиме прерывистой проводимости ток на индуктивном элементе достигает нуля и будет держать это значение на некоторое время. Указанные два суб – интервала существуют также в этом случае [63]. Отличие заключается во втором суб-интервале. На этом этапе, ток индуктивного элемента уменьшается до нуля и стремится присвоить отрицательное значение но диод будет смещен в обратном направлении и не будет проводить ток. Преобразователь переходит на третий суб-интервал при котором индуктивный ток равен нулю на некоторое время и нагрузка питается полностью от конденсатора. Указанный режим закончивается когда замыкается ключ и ток индуктивного элемента начинает увеличиваться от нуля (в отличие от режима непрерывной проводимости при котором ток имеет некоторую минимальную величину).

Поскольку выходное напряжение преобразователя $v(t)$ является функцией от рабочего цикла D , можно проектировать систему управления которая бы меняет D чтобы выходное напряжение следовало эталонное значение напряжения v_r . Рисунок 2.6 иллюстрирует блок диаграмму преобразователя с обратной связью. Выходное напряжение измеряется делителем напряжения и оно сравнивается с заданным значением напряжения v_r . Результирующий сигнал рассогласования проходит по компенсаторному блоку и управляющий сигнал $v_c(t)$ подается в широтно импульсный модулятор. Модулятор производит коммутацию сигнала напряжения который управляет затвор МОП транзистора Q_r . Рабочий цикл D сигнала напряжения пропорционален управляющему сигналу напряжения $v_c(t)$.

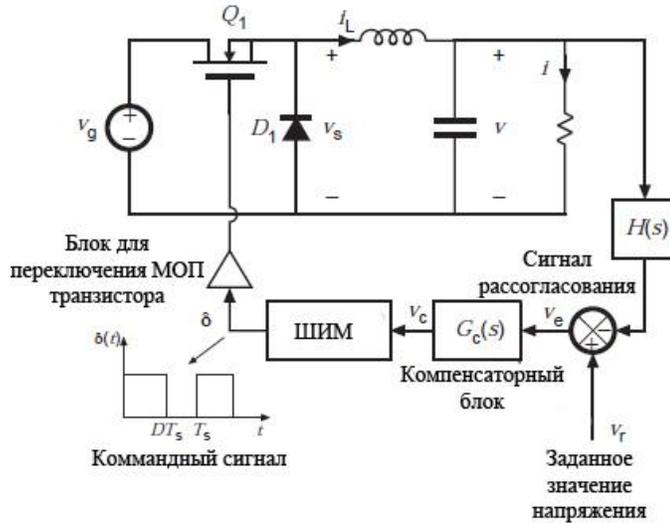


Рис. 2.6 Понижающий преобразователь с обратной связью для регулирования выходного напряжения [62]

При правильном проектировании системы управления, рабочий цикл автоматически регулируется таким образом, чтобы выходное напряжение преобразователя следовало заданное (эталонное) значение напряжения v_r и могло бы не зависимо от изменений v_g или тока нагрузки функционировать.

Преимуществом понижающего преобразователя является его высокая эффективность (примерно 90%). В качестве недостатков можно привести создаваемый шум в связи с механизмом переключения. Спецификации для понижающих преобразователей могут показать широкий диапазон входных напряжений. Например понижающий преобразователь LTC3388-3 работает в интервале входных напряжений от 2,7 до 20 В и на его выходе генерируется 2,8 В, 3,0 В, 3,3 В и 5 В. Напряжение 2,8 В считается значением с которым датчик газа может работать [15]. Однако при сборе энергии от альтернативных источников энергии, нужно учитывать выходное напряжение от устройств сбора энергии. Если обратиться в таблицу 2.1, 2.2 и 2.3 из и в качестве датчика, микроконтроллера и передатчика брать ДТК- 2, ETRX35x и ATxmega32A4, можно будет суммарное значение потребления тока вычислить

$$\sum I = i_s + i_m + i_t \quad (2.5)$$

где i_s - ток потребления датчика который равен 55 мА, i_m - ток потребления микроконтроллера который составляет 1,1 мА в активном режиме и в 0,7 мА. i_t - ток потребления передатчика который равен 31 мА в режиме передачи и 25 мА в режиме

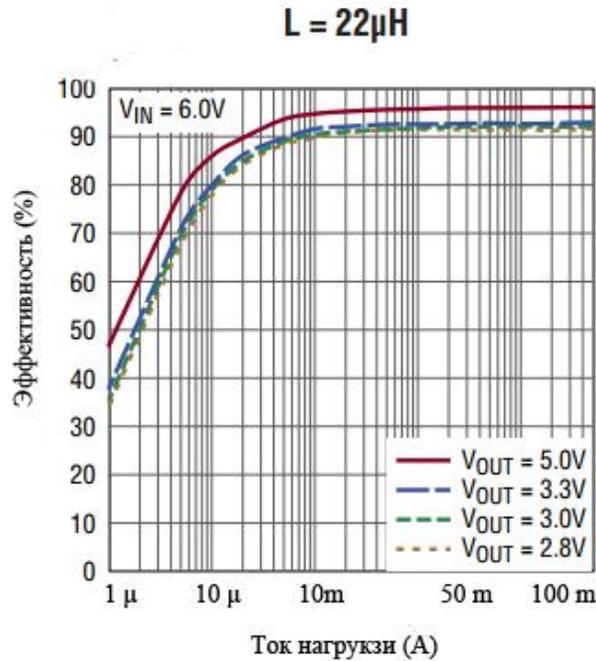


Рис. 2.7. Эффективность понижающего преобразователя LTC3388-3 в зависимости от тока нагрузки [64]

приема. Если учитывать случай когда сенсорный модуль находится в активном режиме тогда суммарный ток будет:

$$\Sigma I = 55 + 1,1 + 31 \sim 87 \text{ mA} \quad (2.6)$$

Когда сенсорный модуль находится в энергосберегающем режиме

$$\Sigma I = 0,0007 + 25 \sim 25 \text{ mA} \quad (2.7)$$

Если применять преобразователь LTC3388-3 в блоке сбора энергии, можно видеть, что данный конвертер может обеспечить ток потребления сенсорного модуля в обоих режимах с эффективностью 90% когда выходное напряжение составляет 2,8 В. Рисунок 2.7 демонстрирует кривые эффективности преобразователя для разных выходных напряжений при входном напряжении 6 В.

Схема повышающего преобразователя с точки зрения топологии похожа на понижающий преобразователь. На рисунке 2.8 показана схема повышающего преобразователя. Повышающий конвертер генерирует напряжение которое по величине больше чем входное напряжение. Коэффициент преобразования такого конвертера равен:

$$M(D) = \frac{1}{1-D} \quad (2.8)$$

Рисунок 2.9 демонстрирует коэффициент преобразования повышающего преобразователя в зависимости от рабочего цикла. Когда ключ S_1 замкнут на время t_1 , ток индуктивного элемента возрастает и энергия накапливается на нем. Когда ключ S_1 разомкнут на время t_2 , накопленная энергия передается нагрузке через диод D_1 .

В случае повышающего преобразователя также существует два режима работы: непрерывная и прерывистая проводимость. Предполагается, что перед замыканием ключа, на индуктивном элементе существует некоторое минимальное значение тока. Как только включается ключ первый суб-интервал начинается. Ток индуктивного элемента линейно увеличивается. Отрицательное напряжение на диоде выключает диод. Поэтому ток не проходит по диоду и нагрузка полностью питается через конденсатор.

Ток индуктивного элемента линейно возрастает пока ключ не выключен. Когда ключ размыкается, начинается второй суб-интервал. Энергия индуктивного элемента начинает извлекаться когда ключ размыкается и в результате этого диод будет проводить ток. После этого часть энергии индуктивного элемента питает нагрузку и часть из нее заряжает конденсатор.

Ток индуктивного элемента уменьшается и достигает нулевого уровня пока ключ разомкнут. Поскольку предполагается, что преобразователь работает при режиме непрерывной проводимости, ключ включается перед тем, как ток прекращается. После этого цикла повторяется. Как и в случае понижающего преобразователя, повышающий конвертер переходит в режим прерывистой проводимости когда ток на индуктивном элементе достигает нулевого уровня и будет оставаться в этом состоянии.

Первые два суб-интервала похожи режиму непрерывной проводимости [65]. На втором суб-интервале ток индуктивного элемента уменьшается и ключ не будет замыкаться когда ток прекращается.

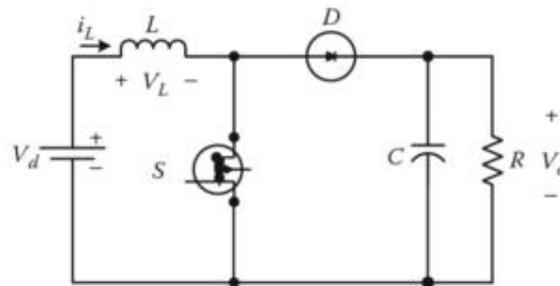


Рис. 2.8. Схема повышающего преобразователя [65]

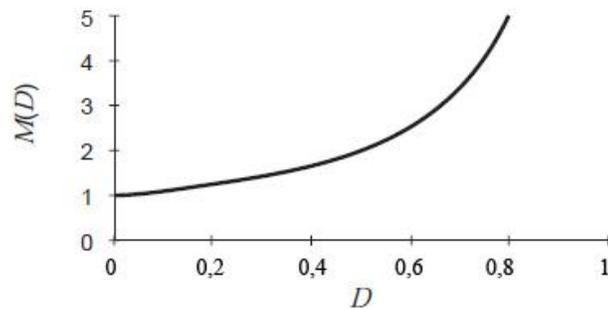


Рис. 2.9 Коэффициент преобразования повышающего преобразователя в зависимости от рабочего цикла

Поэтому ток будет по величине равен нулю и третий интервал начинается. При этом ток стремится достигать отрицательных значений. Однако диод предотвращает протекание тока по обратному направлению. По этой причине, ток остается на нулевом уровне на некоторое время пока ключ разомкнут. Когда ключ замыкается, ток начинает увеличиваться и указанный суб-интервал закончивается.

Необходимо отметить, что при разработке повышающего преобразователя, нужно проектировать ключ и диод в зависимости от напряжения и тока которые ими управляют при всех возможных режимах работ. Индуктивный элемент должен быть спроектирован таким образом, чтобы приводить преобразователь в действие при надлежащем режиме работы. Конденсатор должен соответствовать требованиям к пульсации напряжения.

Повышающие преобразователи обладают высокой эффективностью (которая может достигать больше 90% [63], [66]). В качестве примера можно привести повышающий преобразователь TPS61201 [67]. Как ранее было указано, датчик газа может работать с напряжением примерно 3 В. TPS61201 создает выходное напряжение 3,3 В при разных входных напряжениях. Поэтому можно его применять в блоке аккумулирования энергии. Данный преобразователь генерирует необходимый ток питания беспроводного датчика газа (т.е., 87,1 мА) для его активного режима работы эффективностью 90%. TPS61201 обеспечивает ток потребления эффективностью 80% когда сенсорный модуль находится в энергосберегающем режиме.

Одним членом семейства DC/DC преобразователей является повышающий/понижающий преобразователь. Схема такого преобразователя показана на рис. 2.10. Когда ключ замкнут, диод будет смещен в обратном направлении и ток проходит по индуктивному элементу и в результате этого энергия накапливается на катушке. Когда ключ разомкнут напряжение индуктивного элемента меняет свою полярность и накопленная энергия передается конденсатору и нагрузке. В этом преобразователе выходное напряжение имеет отрицательное значение и коэффициент преобразования задается уравнением 2.10

$$M(D) = \frac{-D}{1-D} \quad (2.10)$$

График 2.11 иллюстрирует зависимость коэффициента преобразования повышающего/понижающего конвертера от рабочего цикла. Значение D может выбираться таким образом, чтобы выходное напряжение было больше или меньше входного. Повышающий/понижающий преобразователь может работать в режимах непрерывной или прерывистой проводимости.

Для описания работы преобразователя в непрерывном режиме предполагается, что индуктивный элемент имеет некоторое конечное значение тока перед временем $t = 0$ (т.е. время замыкания ключа). Как только включается ключ начинается первый суб интервал времени переключения. Ток индуктивного элемента увеличивается до максимального значения. При этом диод смещен в обратном направлении и нагрузка питается от конденсатора в этом суб-интервале и поэтому он разряжается.

Ток индуктивного элемента увеличивается до тех пор пока ключ замкнут. Комманда размыкания ключа может выдаваться широтно импульсной модуляцией, частотно импульсной модуляцией или другим контроллером.

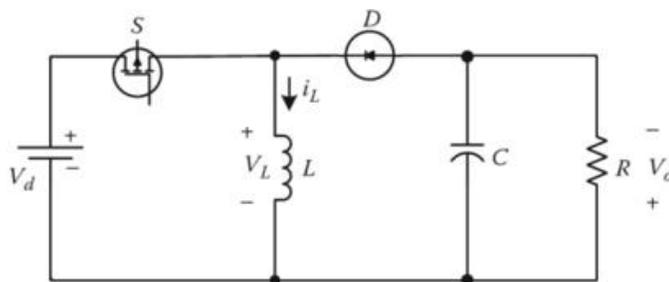


Рис. 2.10. Схема повышающего/понижающего преобразователя [65]

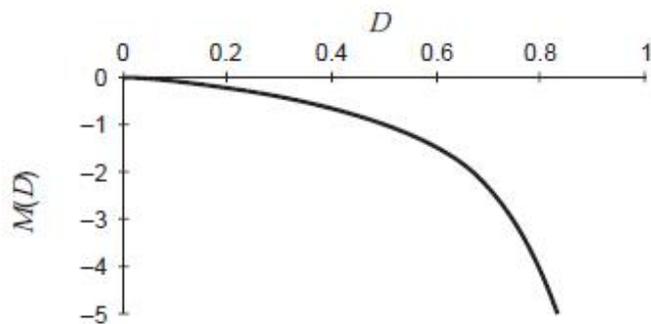


Рис. 2.11. Зависимость коэффициента преобразования повышающего/понижающего преобразователя от рабочего цикла [62]

После того, как ключ размыкается первый суб интервал закончивается и начинается второй. Во втором суб интервале извлекается вся энергия индуктивного элемента. Часть этой энергии расходуется на зарядку конденсатора и часть ее питает нагрузку. Диод в этом режиме работы включен и позволяет току катушки проходить по нему. Ток катушки уменьшается и приближается к нулю. Он не будет достигать нуля поскольку этот конвертер работает в непрерывном режиме. В этом случае замыкается ключ и ток индуктивного элемента увеличивается.

При работе преобразователя в прерывистом режиме, первые два суб интервала считаются такими же как и в непрерывном режиме работы. Отличие заключается в том, что существует еще третий суб интервал и он начинается после того, как значение тока катушки равняется нулю. Ток индуктивного элемента стремится достигать отрицательных значений. Однако диод не проводит ток в обратном направлении и поэтому ток остается на нулевом уровне. Третий суб интервал закончивается после того, как ключ замыкается. Необходимо отметить, что при прерывистом режиме, ток индуктивного элемента имеет начальное нулевое значение. Поскольку напряжение питания для сенсорного молудя составляет примерно 3 В можно в качестве примера рассматривать эффективность преобразования TPS63001 [68]. Учитывая ток потребления сенсорного модуля в активном режиме (т.е., ~87,1 мА), данный преобразователь обеспечивает эффективности до 90%. Для случая когда сенсорный модуль находится в энергосберегающем режиме эффективность составляет 80%.

Применение повышающего/понижающего преобразователя может быть надлежащим вариантом для питания сенсорного модуля от альтернативных источников энергии поскольку входное напряжение может меняться по времени.

Спецификации для повышающих/понижающих преобразователей могут показать широкий диапазон входных напряжений в зависимости от задачи.

Для питания устройств потребляющих от батарей более узкий диапазон напряжений может применяться; в многих случаях это диапазон напряжений от 1,8 В до 5,5 В [69] которое и может быть справедливо для задач питания беспроводных датчиков газа от альтернативных источников энергии. Однако в промышленности значения для входных напряжений могут меняться в более широких интервалах.

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. TPS61200 может выработать ток необходимый (87 мА в соответствии с таблицей 2.4) для работы беспроводного газового датчика с эффективностью примерно 90%.

2.5 Разработка алгоритма оптимизации сбора солнечной энергии для энергоустановки

В случае зарядки суперконденсатора от солнечной панели, необходимо отметить, что солнечные панели имеют пик мощности при определенном значении напряжения и тока (рис. 2.12). 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 точек кривой ВАХ приведет к значительному снижению выходной мощности и последовательно уменьшению эффективности. Алгоритм который предложен в данной главе для эффективной зарядки солнечной панели иллюстрирован на рис. 2.13. Процесс зарядки от солнечной панели включает в себя два режима: понижающий и повышающий. В обоих случаях используется DC/DC преобразователь тока. Указанное преобразование проводится с постоянным временем зарядки (т.е., включение) и разрядки (т.е., выключение) индуктивного элемента.

Понижающий режим выбирается когда напряжение суперконденсатора меньше чем выходное напряжение солнечной панели. В противном случае выбирается повышающий режим.

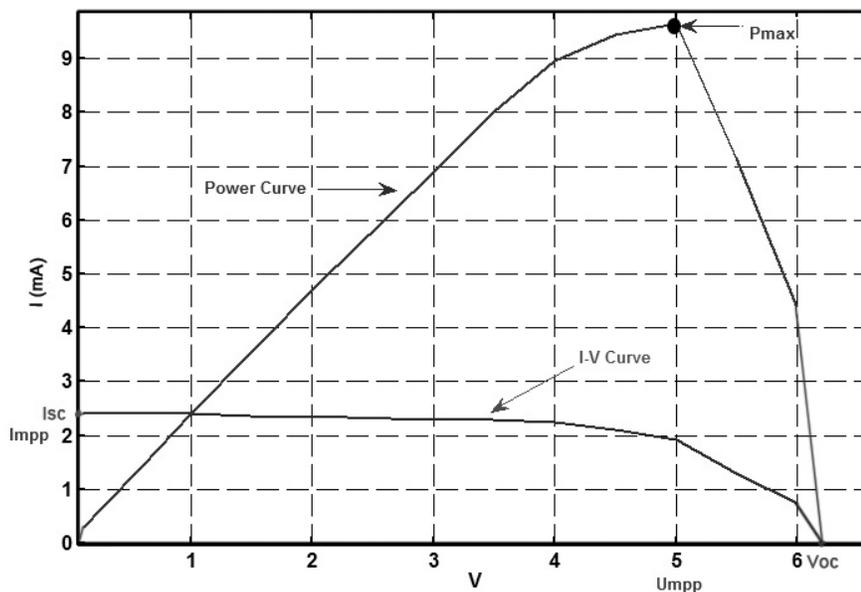


Рис.2.12. Кривые мощности и ВАХ солнечной панели

Когда происходит переключение режима работы преобразователя, время разрядки индуктивного элемента сбрасывается на его максимальное значение. После этого, оно (время разрядки) управляется алгоритмом балансировки тока нагрузки.

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 время перестает уменьшаться. Перевыравнивание тока нагрузки солнечной панели выполняется периодически путем сдвига времени разрядки индуктивного элемента на несколько шагов и нахождения новой оптимальной точки.

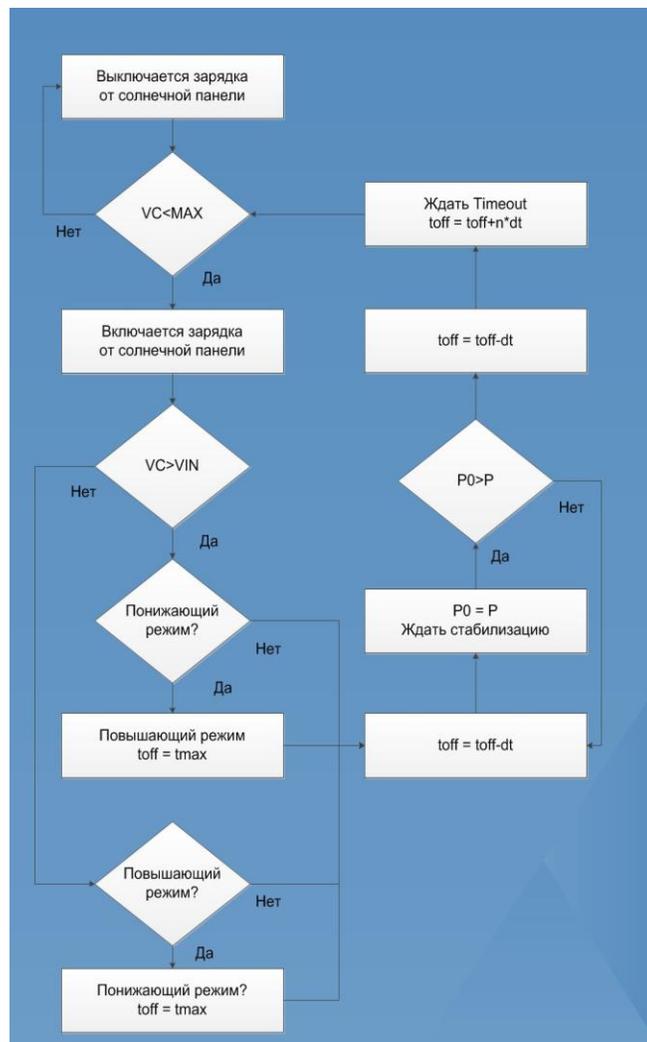


Рис. 2.13. Упрощенный алгоритм для зарядки от солнечной панели

2.6 Выводы

- Энергоустановка должна состоять из следующих частей: входной блок, включающий себя литиевый элемент и альтернативные источники питания (солнечная батарея, ветрогенератор и др.), блок коммутации и хранения энергии, блок выбора источника питания и преобразователь напряжения.
- Предполагаемое число циклов заряд-разряд в течение 10 лет работы (порядка 100 000 раз) однозначно определяет выбор суперконденсатора в качестве накопителя энергии.
- Энергоустановка по аккумулярованию энергии должна быть оснащена резервным источником питания таким как литиевый элемент чтобы обеспечить питание в интервалах времени когда энергия от альтернативных источников энергии не достаточна для питания беспроводного газового датчика.
- Чтобы отслеживать уровень напряжения на конденсаторах и выбрать источник питания в платформе реализуется блок мониторинга мощности.
- Разработку платформы аккумулярования энергии можно проводить таким образом чтобы она могла бы работать с разными устройствами сбора энергии в плане выходного напряжения. Необходимо отметить, что этот подход с одной стороны увеличивает гибкость системы а с другой стороны ее сложность.
- Чтобы преобразовать необходимый уровень напряжения для беспроводного газового датчика можно применять линейный регулятор или импульсные преобразователи.
- Особенностью линейных регуляторов является их простота схемы и низкий уровень шума. Однако их эффективность уменьшается по мере возрастания разности входного напряжения от выходного.
- Другим вариантом преобразования уровня напряжения является применение понижающих преобразователей. Для рассмотрения эффективности преобразователя были вычислены ток потребления беспроводного сенсорного модуля по образцу газа в активном и энергосберегающем режимах. В

качестве примера был analyzed LTC3388-3 эффективность которого при работе сенсорного модуля в указанных режимах составляет 90%.

- Для оценки эффективности повышающего преобразователя был рассмотрен случай с TPS61201 конвертером. Учитывая ток потребления беспроводного газового датчика, эффективность указанного преобразователя при работе сенсорного модуля в активном и энергосберегающем режимах составляет 90% и 80%. Однако эффективность может ухудшаться при низком уровне входного напряжения. Например, в случае питания беспроводного газового датчика от альтернативных источников энергии, выяснилось, что при подаче входного напряжения 0,3 В на TPS61200 конвертер не может работать надлежащим образом и преобразовать напряжение 2,8 В на его выходе.
- Повышающий/понижающий преобразователь является одним из подходящих конвертеров для применения в блока питания беспроводных датчиков газа. Это связано с тем, что энергия от альтернативных источников энергии меняется и в зависимости от этого нужно увеличить или уменьшить напряжение на выходе преобразователя. В качестве примера была рассмотрена эффективность преобразователя TPS63001 которая при активном и энергосберегающем режимах работы датчика составляет 90% и 80%.
- Предложен алгоритм на основе которого нахождение точки максимальной мощности солнечной панели может осуществляться декрементным изменением времени разрядки и сравнением выходной мощности солнечной панели до и после этих изменений. Если выходная мощность солнечной панели максимальна время перестает уменьшаться. Перебалансировка тока нагрузки солнечной панели выполняется периодически путем сдвига времени разрядки индуктивного элемента на несколько шагов и нахождения новой оптимальной точки
- Освоив вышеуказанные концепции, можно получить теоретические основы разработки платформы аккумулирования энергии из окружающей среды для питания беспроводных датчиков газа.

ГЛАВА 3. Разработка энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии для питания беспроводных датчиков газа

3.1. Проектирование схемы энергоустановки по аккумулярованию энергии от возобновляемых источников энергии

Данная глава диссертации посвящена разработке электрической схемы энергоустановки по аккумулярованию энергии от альтернативных источников энергии и описанию и ее работы. Питание датчика осуществляется от солнечной энергии и энергии ветра. Датчик оснащён портативной солнечной батареей и ветрогенератором постоянного тока. Из таблиц 2.1-2.3 следует, что 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. Энергия от альтернативных источников энергии аккумулируется в суперконденсаторах (400 Ф, 2,7 В). Каждый канал поступления альтернативной энергии подключен к соответствующему конденсатору (С1 и С2, рис. 3.1). 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. В качестве резервного источника питания в датчике используется литиевый элемент с напряжением 3,7 В.

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. 3.1). Макет интегрируемого в корпус сенсорного узла интеллектуального источника питания должен обеспечивать энергоемкость источника питания не менее 5 Вт·час, количество циклов заряд-разряд не менее $5 \cdot 10^4$. Число требуемых циклов заряда и разряда по техническому заданию означает, что в качестве накопителей энергии необходимо применять суперконденсаторы и обеспечение мощности

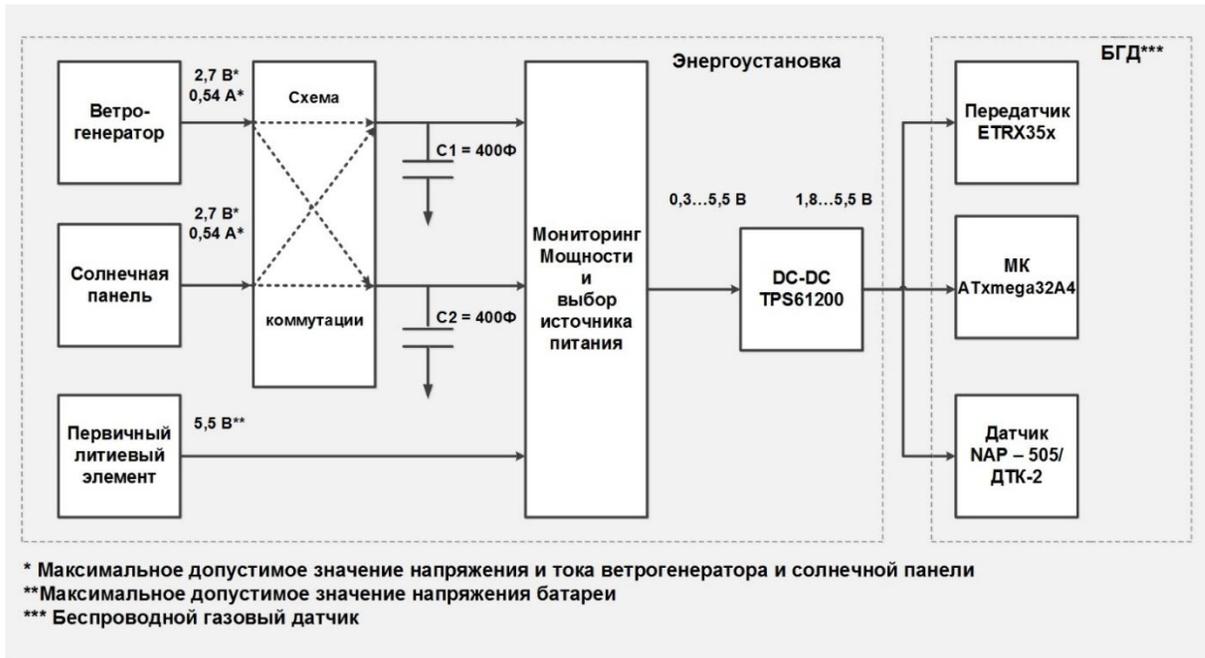


Рис. 3.1. Блок схема беспроводного газового датчика с питанием от энергоустановки

5 Вт·час требует использование литиевого элемента в энергоустановке. Литиевые элементы имеют напряжение 3,6 и ток 3000 мА, 8000 мА и 15000 мА для типов AA, B и D соответственно. Таким образом мощность для типа AA, B и D составляет 10 Вт·час, 29 Вт·час и 54000 Вт·час. Применение суперконденсатора предпочитается поскольку он обладает большим числом заряда и разряда.

Схема платформы сбора энергии состоит из следующих частей: входной блок, включающий в себя первичный литиевый элемент и альтернативные источники энергии (солнечную батарею, ветрогенератор и т.д) блок коммутации и хранения энергии, блок выбора источника питания и преобразователь напряжения. Параметры солнечной панели, ветрогенератора и накопительных элементов приведены в таблице 3.1.

В входной блок источника питания входят литиевый элемент и устройства сбора энергии, которые подключаются к входным разъемам схемы источника питания (рис. 3.2). К каналу 1 (СН1 на схеме) подключается солнечная батарея, к каналу 2 (СН2 на схеме) подключается ветрогенератор.

Входные напряжения от первичного литиевого элемента и альтернативных источников энергии питания (солнечной энергии по каналу СН1 и ветровой СН2) поступают на коммутационный блок,

Таблица 3.1 – Мощности накопителей энергии и устройств сбора энергии

	Литиевый элемент	Суперконденсатор ($V_{max} = 2,7$ В, $V_{min} = 0,9$ В С = 400 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	361,1	59,4	770

который в случае необходимости подключает их к конденсаторам в которых накапливается энергия (V1 для солнечной панели и V2 для ветрогенератора). Накопление энергии от каждого альтернативного источника осуществляется независимо. В соответствии со схемой коммутации представленной на рис. 3.2, в случае полной зарядки основного конденсатора по определенному каналу, зарядка второго конденсатора осуществляется от альтернативного источника который имеет наибольшую мощность. Схема зарядки конденсаторов иллюстрирована на рис. 3.3. Энергия от устройств сбора энергии V1 и V2 накапливается в суперконденсаторах C14 и C15.

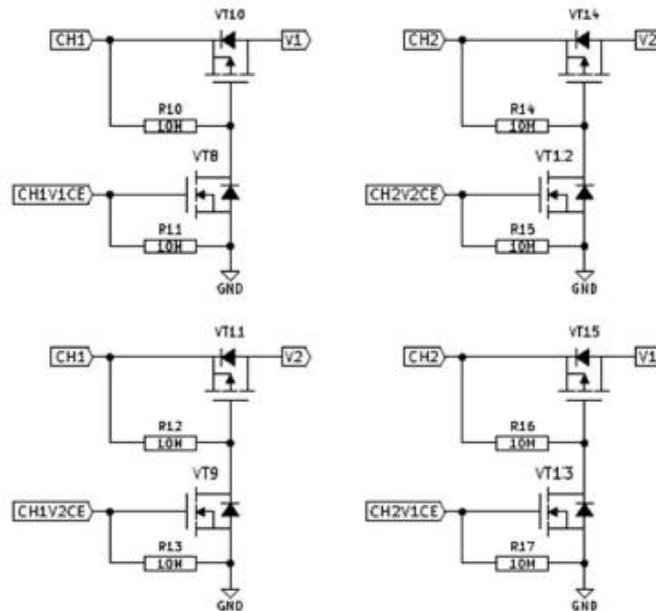


Рис. 3.2. Схема коммутации конденсаторов

Дальше данные об уровнях напряжений на суперконденсаторах передаются микроконтроллеру по выходам CH1LVL и CH2LVL. Конденсатор C13 нужен чтобы нейтрализовать паразитные параметры соединения платы с первичным литиевым элементом.

Управление зарядкой конденсаторов осуществляется программно с помощью микроконтроллера. Микроконтроллер проводит измерения напряжений на конденсаторах и первичном литиевом элементе и выполняет функцию переключения ключей коммутатора в зависимости от полученных значений напряжений. Схема подключения микроконтроллера представлена на рис. 3.4.

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. Рисунок 3.5 показывает схему выбора источника питания.

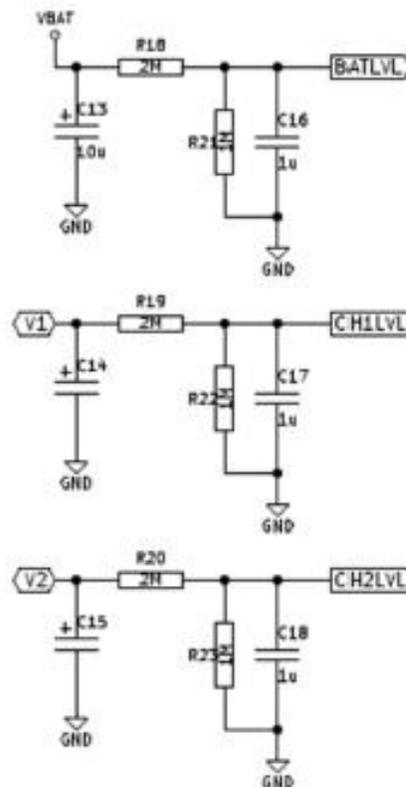


Рис. 3.3. Схема зарядки конденсаторов

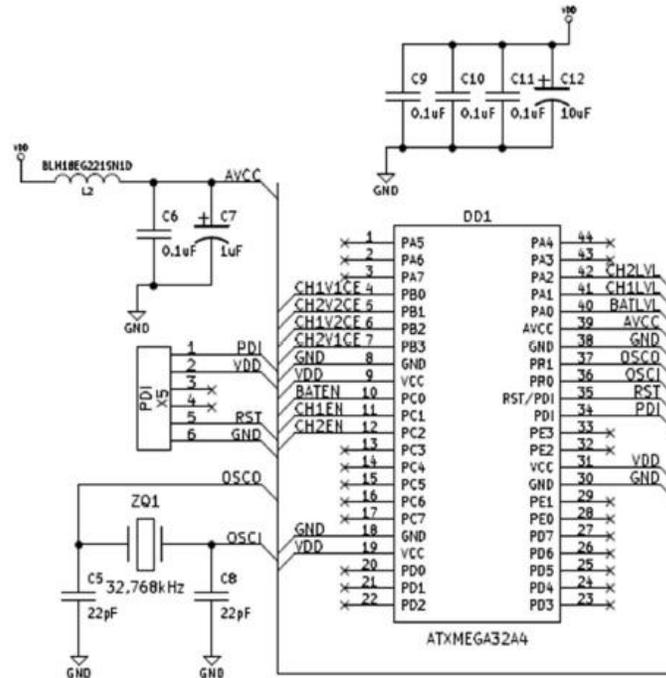


Рис. 3.4. Схема подключения микроконтроллера

На рисунке 3.6 представлена схема DC/DC преобразователя. Поскольку используется контроллер для управления источников питания, необходимо обеспечить стабильный источник питания для его работы. Поэтому при запуске устройства выбирается литиевый элемент.

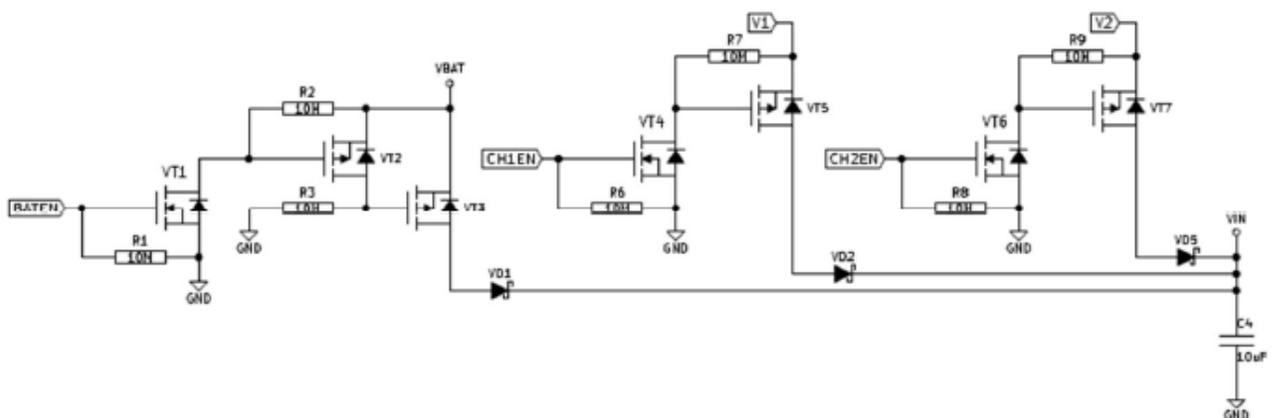


Рис. 3.5. Схема выбора источника питания

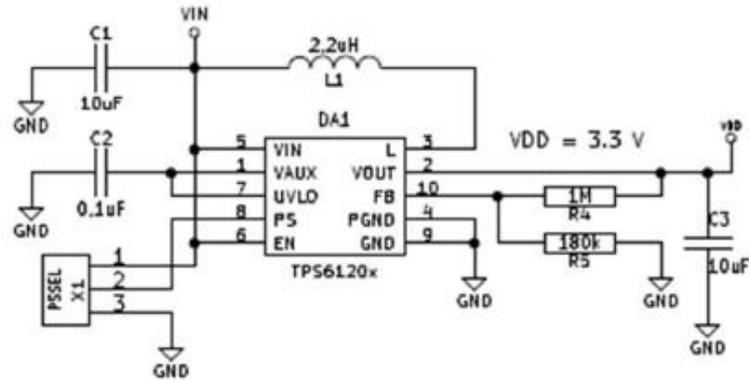


Рис. 3.6. Схема DC/DC преобразователя

После процесса инициализации контроллера и в зависимости от уровня напряжения на суперконденсаторах может переключаться питание от литиевого элемента к питанию от альтернативных источников энергии.

3.2. Алгоритмы выбора источника питания и зарядки суперконденсатора

Как ранее было указано, блок источника питания содержит литиевый элемент и два канала для сбора энергии от альтернативных источников энергии. Один канал предназначен для солнечной панели и другой для ветрогенератора.

Чтобы регулировать ток нагрузки и управлять ток зарядки суперконденсаторов в процессе зарядки, применяется DC/DC преобразователь тока. Управление DC/DC преобразователей осуществляется контроллером источника питания. Энергия для преобразования накапливается в индуктивных элементах которую можно использовать для выполнения процесса понижения или повышения.

Процесс зарядки осуществляется программой контроллера источника питания. Программа содержит потоки которые выполняются периодически: выбор источника питания для сенсорной платформы, выбор источника для зарядки суперконденсаторов, управление зарядки от ветрогенератора и от солнечной панели. Одновременно с этими процессами потоки для DC/DC преобразования тока выполняются.

Эти потоки запускаются на события таймера контроллера источника питания и обеспечивают переключение ключей на основе предназначенных параметров чтобы зарядить и разрядить индуктивные элементы. В промежутках между всеми этими потоками контроллер переходит в режим энергосбережения. В процессе запуска, в качестве источника питания используется литиевый элемент который тоже применяется как резервный источник питания. После запуска и инициализации контроллера, при наличии достаточном количестве напряжения на суперконденсаторах питание будет переключаться на один из них. В начале потока, выбор источника питания осуществляется виртуально и в конце выбор проводится на основе операций. Сначала выбирается литиевый элемент. Этот источник питания применяется по умолчанию. Дальше сравнивается количество напряжения на суперконденсаторе с их установленными минимальными значениями. Чтобы предотвращать непрерывное переключение источников питания, уровни напряжения действуют на основе алгоритма гистерезиса который замедляет реакцию системы. Переключение на питание от резервного источника питания (т.е., литиевого

элемента) к питанию от альтернативных источников энергии происходит когда напряжение на суперконденсаторах подключенных к СН1 и СН2 превысит 0,9 В. Выбор источника питания от солнечной батареи или от ветрогенератора осуществляется исходя из сравнения напряжений на конденсаторах (С14 и С15 на рис. 3.3). Для питания выбирается тот конденсатор, который больше заряжен. Если значение напряжения на обоих суперконденсаторах равны друг другу и по величине больше 0,9 В тогда алгоритмы которые встроены в микроконтроллере определяют какой суперконденсатор будет питать беспроводной датчик (в зависимости от климатических условий при которых беспроводной датчик газа работает, указанное условие определяется – рис. 3.7 а).

Зарядка суперконденсатора может осуществляться любым источником питания: либо солнечной панелью либо ветрогенератором. Если напряжение на суперконденсаторе накапливающим солнечную энергию, достиг максимального значения или другими словами если он уже накопил достаточную энергию и уровень напряжения на суперконденсаторе от ветрогенератора меньше чем максимум и выходная мощность от ветрогенератора меньше чем выходная мощность солнечной панели, суперконденсатор от ветрогенератора переключается на зарядку от солнечной панели и ветрогенератор останавливает работу. Таким же образом если уровень напряжения на суперконденсаторе накапливающим ветровую энергию, больше чем максимум и напряжение суперконденсатора от солнечной панели меньше чем максимум и выходная мощность солнечной панели меньше чем та которая на выходе ветрогенератора, суперконденсатор от солнечной панели переключается на зарядку от ветрогенератора и питание от солнечной панели выключается. Указанная логика иллюстрирована на рис. 3.8.

б. Чтобы предотвращать частое переключение используется алгоритм гистерезиса. По умолчанию зарядка суперконденсатора выключена. Если уровень напряжения на нем меньше максимума включается зарядка.

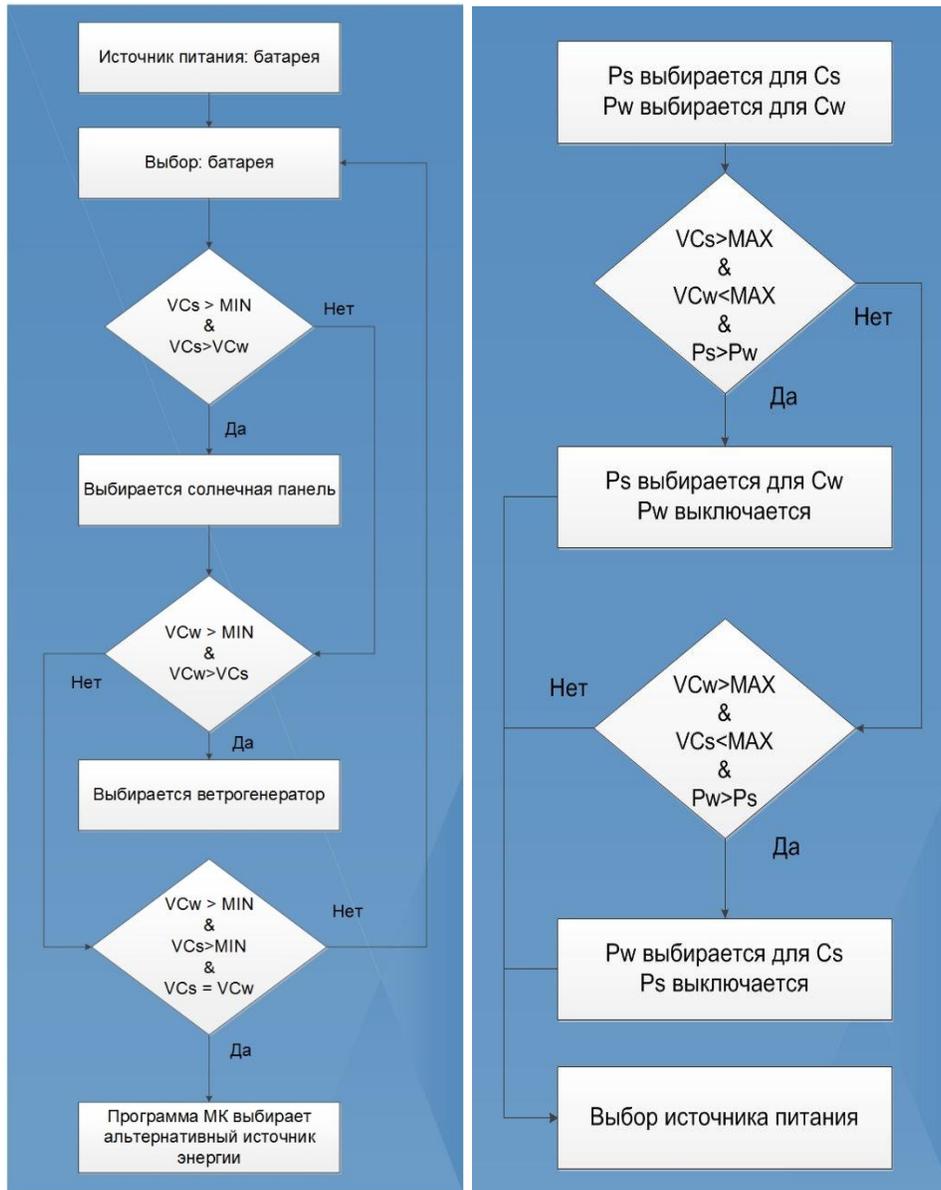


Рис. 3.8 – (а) Упрощенный алгоритм для выбора источника питания; (б) упрощенный алгоритм для выбора источника зарядки

3.3. Реализация макета интеллектуального источника питания интегрируемого в корпус сенсорного узла с возможностью генерации и накопления энергии Солнца и ветра

Для проверки параметров и характеристик схемы интеллектуального источника питания с возможностью генерации и накопления электрической энергии от альтернативных источников энергии разработан макет указанной схемы.

Макет платформы аккумулирования энергии представляет собой печатную плату интеллектуального источника питания с возможностью генерации ее в корпус сенсорного узла и выполнен на основе электрической схемы автономного питания экспериментального образца универсальной цифровой платформы с накоплением энергии на основе сверхёмких тонкопленочных конденсаторных ячеек и контуром заряда от альтернативных источников энергии. Печатная плата макета состоит из двух слоев. При разработке печатной платы учитывались следующие условия.

В соответствии с уравнением 3.1., минимальные ширина и толщина проводников на плате определяется, прежде всего, на основе требуемой токонесущей способности и максимально допустимого повышения температуры проводника.

$$I = K \Delta T^{0,44} A^{0,725} \quad (3.1)$$

где I – ток в амперах, A – поперечное сечение в квадратных милах, ΔT – увеличение температуры в °C и K – константа; $K = 0,048$ для внешних слоев и $K = 0,024$ для внутренних слоев.

При этом, допустимое повышение температуры проводников определяется как разность между максимально безопасной рабочей температурой материала ламината печатной платы и максимальной температурой окружающей среды, воздействию которой будет подвергаться печатная плата.

Минимальное расстояние между проводниками и другими элементами приводящего рисунка определяется рабочим напряжением и должно соответствовать таблице 3.1. При этом требования к электрическому зазору для наружных проводников существенно выше, чем для проводников, которые будут защищены от внешних загрязнений конформным покрытием. Электрический ток протекает только по замкнутому контуру. Это верно как для сигналов, так и для источников питания. При этом, такой контур эмитирует шум и чем

больше контур, тем выше шум. Шум так же увеличивается с ростом силы тока и частоты. Кроме того, большой контур с большей вероятностью принимает шум. Таким образом, необходимо стремиться к уменьшению площади контура.

Лучшим способом обеспечить минимальную площадь контура является добавление земляного слоя на печатную плату. При этом площадь контура будет равна длине линии передачи умноженной на расстояние между проводниками и земляным слоем. Эта область обычно значительно меньше, чем может быть получена разводкой земляных проводников. Таким образом, шум платы с земляным слоем значительно ниже, чем без него.

Цифровые устройства, такие как микроконтроллер или приемопередатчик, имеют достаточно широкий диапазон напряжений питания и потребляют ток лишь несколько миллиампер. Но поскольку они являются цифровыми, значение потребляемого ими тока является средним. Ток потребляется ими очень короткими импульсами на фронтах тактовых импульсов. При переключении внешних выводов микросхем импульсный потребляемый ток увеличивается. Импульсы тока по линиям питания могут достигать сотен миллиампер. При этом ширина импульсов зачастую лишь несколько наносекунд. Такой импульсный ток не может быть передан по длинным линиям питания. При этом основным источником тока для цифрового устройства становится развязывающий конденсатор.

Таблица 3.1. Электрический зазор между проводниками

Напряжение между проводниками (Постоянный ток и амплитуды переменного тока)	Минимальный зазор						
	Несмонтированная плата				Сборка (модуль)		
	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7
0 -15	0,05 мм	0,1 мм	0,1 мм	0,05 мм	0,13 мм	0,13 мм	0,13 мм
16-30	0,05 мм	0,1 мм	0,1 мм	0,05 мм	0,13 мм	0,25 мм	0,13 мм
31-50	0,1 мм	0,6 мм	0,6 мм	0,13 мм	0,13 мм	0,4 мм	0,13 мм
51-100	0,1 мм	0,6 мм	1,5 мм	0,13 мм	0,13 мм	0,5 мм	0,13 мм

101-150	0,2 мм	0,6 мм	3,2 мм	0,4 мм	0,4 мм	0,8 мм	0,4 мм
151-170	0,2 мм	1,25 мм	3,2 мм	0,4 мм	0,4 мм	0,8 мм	0,4 мм
171-250	0,2 мм	1,25 мм	6,4 мм	0,4 мм	0,4 мм	0,8 мм	0,4 мм
251-300	0,2 мм	1,25 мм	12,5 мм	0,4 мм	0,4 мм	0,8 мм	0,8 мм
301- 500	0,25 мм	2,5 мм	12,5 мм	0,8 мм	0,8 мм	1,5 мм	0,8 мм
>500	0,0025 мм/в	0,005 мм/в	0,025 мм/в	0,00305 мм/в	0,00305 мм/в	0,00305 мм/в	0,00305 мм/в

Важным вопросом является правильное подключение развязывающего конденсатора. На рисунке 3.9 показан пример неправильного подключения. Конденсатор расположен слишком далеко от цифрового устройства, создавая контур с высоким током. При этом, линии питания и земли являются частью этого контура. В результате шум на линиях питания легко распространяется на другие устройства на плате и кроме того, сам уровень шума увеличивается.

Правильное подключение конденсатора представлено на рис. 3.10. Линии являющиеся частью контура высокого тока, не являются частью линий питания и земли. Таким образом, не распространяют шум на другие устройства.

Цифровые микросхемы, выводы питания которых расположены вблизи друг от друга, позволяют осуществить развязывание более эффективно, чем те выводы питания которых расположены раздельно. Поскольку производители часто предлагают несколько вариантов корпусирования микросхем, для обеспечения лучших характеристик печатной платы следует выбрать те выводы питания которых расположены вместе.

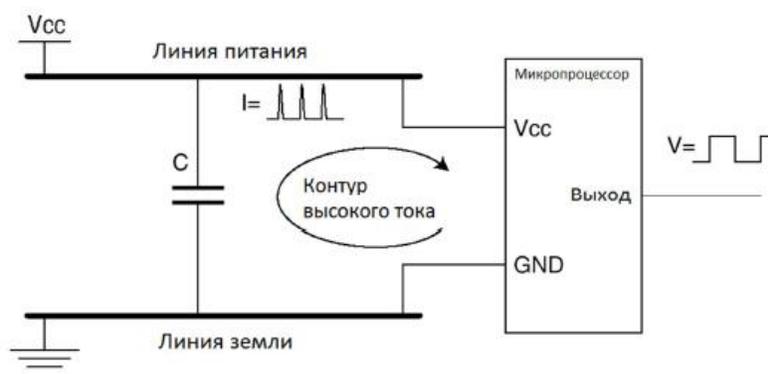


Рис. 3.9 - Неправильное подключение развязывающего конденсатора [80]

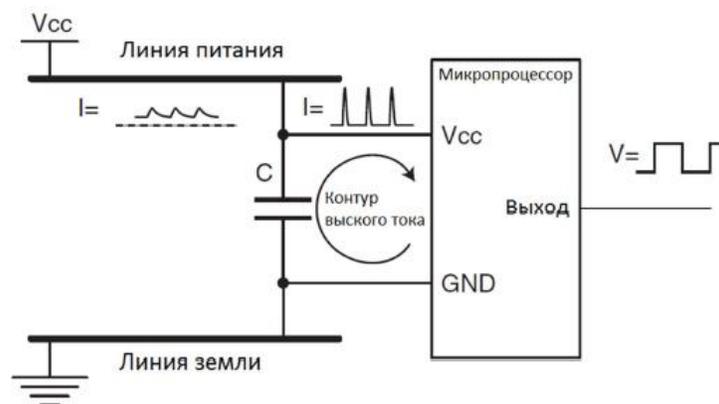


Рис. 3.10 - Правильное подключение развязывающего конденсатора

Для устройств с несколькими парами выводов питания развязывающий конденсатор должен быть размещен вблизи каждой пары.

Поскольку устройство не содержит мощных потребителей тока, то для всех частей устройства предъявляются общие требования, обусловленные технологией изготовления печатной платы. Ширина дорожек и расстояние между ними должны быть не менее 0,2 мм. Диаметр переходных отверстий не менее 0,4 мм и минимальный диаметр монтажных отверстий – 0,6 мм. Топология целиком представлена на рис. 3.11. На рис. 3.12 представлена фотография печатной платы макета.

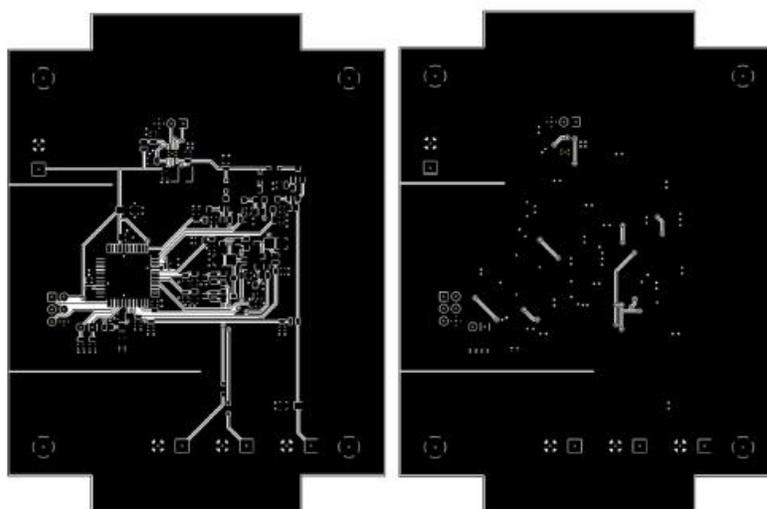


Рис. 3.11 - топология печатной платы макета

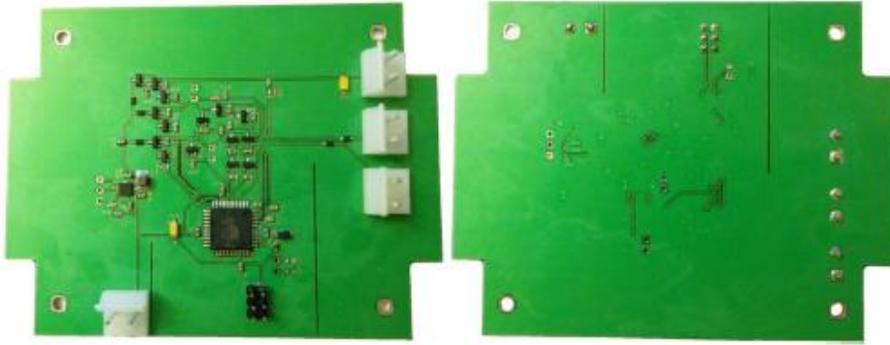


Рис. 3.12 - фотография печатной платы макета

3.4 Выводы

- В данной главе был представлен ход проектирования и реализации энергоустановки для питания беспроводного газового датчика которая аккумулирует энергию от солнечной и ветровой энергии.
- В структуру платформы сбора энергии входят литиевый элемент, входной блок для сбора энергии от альтернативных источников энергии (солнечная батарея, ветрогенератор и т.д) блок коммутации и хранения энергии, блок выбора источника питания и мониторинга мощности и преобразователь напряжения.
- Энергоустановка должна обеспечивать энергоемкость не менее 5 Вт·час, количество циклов заряд-разряд не менее $5 \cdot 10^4$. Число требуемых циклов заряда и разряда по техническому заданию означает, что в качестве накопителей энергии необходимо применять суперконденсаторы и обеспечение мощности 5 Вт·час требует использование первичного литиевого элемента в платформе аккумулирования энергии.
- Энергия от альтернативных источников энергии накапливается в суперконденсаторах емкостью 400 Ф. Датчик будет питаться от литиевого элемента, если напряжение на суперконденсаторах меньше 0,9 В. Если напряжение на обоих суперконденсаторах больше 0,9 В выбирается тот, который имеет больше напряжения. В случае полной зарядки основного конденсатора по определенному каналу, зарядка второго конденсатора осуществляется от альтернативного источника который имеет наибольшую мощность.
- DC/DC преобразователь TPS61200 обеспечит следующие параметры: выходное напряжение 1,8 – 5,5 В и выходной ток до 1А.
- Для обеспечения стабильного источника работы устройства сбора энергии при его инициализации, выбирается литиевой элемент в качестве источника питания. После указанного этапа и в зависимости от уровня напряжения на суперконденсаторах может переключаться питание от литиевого элемента к питанию от альтернативных источников энергии.

- Для регулировки тока зарядки накопительных устройств применяется DC/DC преобразователь тока управление которого осуществляется контроллером источника питания.
- Программа контроллера источника питания осуществляет процесс зарядки. Она обладает потоками которые периодически выполняются. Потоки имеют разные функции такие как выбор источника питания для сенсорной платформы, выбор источника для зарядки суперконденсаторов, управление зарядки от ветрогенератора и от солнечной панели. Одновременно с этими процессами выполняются потоки для DC/DC преобразования тока. Эти потоки запускаются на события таймера контроллера источника питания и обеспечивают переключение ключей на основе предназначенных параметров чтобы зарядить и разрядить индуктивные элементы. В промежутках между всеми этими потоками контроллер переходит в режим энергосбережения.
- Чтобы предотвращать непрерывное переключение источников питания, применяется алгоритм гистерезиса для уровней напряжений.
- Суперконденсатор накапливающий солнечную энергию может заряжаться от ветрогенератора если уровень напряжения на суперконденсаторе от солнечной панели меньше чем максимум и выходная мощность от солнечной батареи меньше чем выходная мощность ветрогенератора. После этого, питание от солнечной панели выключается. Суперконденсатор накапливающий энергию ветра может заряжаться от солнечной панели если уровень напряжения на суперконденсаторе от ветрогенератора меньше чем максимум и выходная мощность от ветрогенератора меньше чем выходная мощность солнечной панели. После этого, ветрогенератор отключается.
- При разработке печатной платы учитывались: 1) минимальные ширина и толщина проводников на плате определяется, прежде всего, на основе требуемой токонесущей способности и максимально допустимого повышения температуры проводника. Минимальное расстояние между проводниками и другими элементами приводящего рисунка определяется рабочим напряжением значения которого были показаны в данной главе. 2) Контур по которому протекает электрический ток создает шум. Чтобы минимизировать шум необходимо

стремиться к уменьшению площади контура. Добавление земляного слоя на печатную плату уменьшает шум 3) В качестве источника тока для цифрового устройства применяется развязывающий конденсатор и он подключается таким образом чтобы шум не распространялся на другие устройства. 4) Ширина дорожек и расстояние между ними должны быть не менее 0,2 мм. Диаметр переходных отверстий не менее 0,4 мм и минимальный диаметр монтажных отверстий – 0,6 мм.

- Разработан макет платформы аккумулирования энергии который представляет собой печатную плату интеллектуального источника питания с возможностью генерации ее в корпус сенсорного узла и с накоплением энергии на основе суперконденсаторов и контуром заряда от альтернативных источников энергии. Описаны параметры которые нужно учитывать при разработке печатной платы.

ГЛАВА 4. Результаты экспериментов проведенных с возобновляемыми источниками энергии и автономная работа датчиков CO и CH₄ на основе энергоустановки

4.1 Эксперимент с ветровой энергией

Как в предыдущей главе было указано, модуль сбора энергии аккумулирует энергию Солнца и ветра. Напряжение холостого хода и тока короткого замыкания ветрогенератора при скорости ветра 4,3 м/с составляют 2,2 В и 27 мА. Также были проведены измерения тока короткого замыкания при скоростях 2,5, 3, 3,5, 5, 5,7 и 6 м/с которые по величине были равны 3, 6, 15, 24, 27 и 30 мА. Скорость ветра была измерена с помощью анемометра VOLTcraft (BL – 30) и тахометра VOLTcraft (DT – 10L) были найдены количества оборотов лопасти. В эксперименте были исследованы вольт амперная характеристика и зависимость мощности ветрогенератора от сопротивления нагрузки при скоростях ветра 3,7 м/с и 4,5 м/с (рисунки 4.1(а) и 4.1(б)).

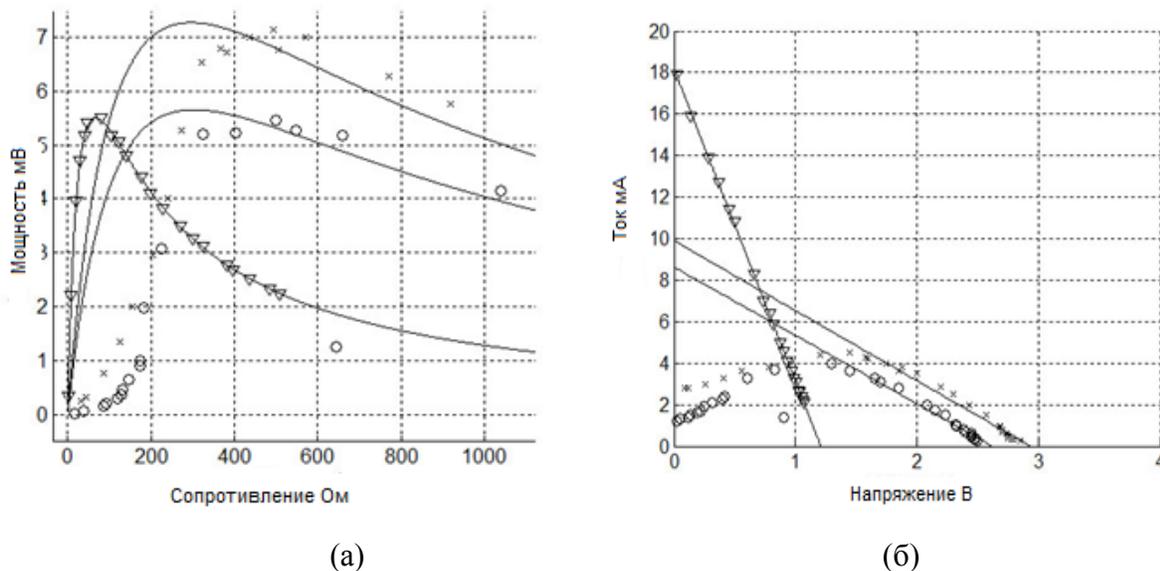


Рисунок 4.1 - (а) Полученная мощность при разных нагрузках; (б) Вольт амперная характеристика; x – Пропеллер с лопастью размером 4,35 см при скорости ветра 4,5 м/с; o - Пропеллер с лопастью размером 4,35 см при скорости ветра 3,7 м/с; ∇ - Пропеллер с лопастью размером 8,85 см при скорости ветра 4,5 м/с; - Линейная аппроксимация

Длина первой лопасти использованного при эксперименте составляет 4,35 см и второй 8,85 см. На рисунке 4.1(а) представлены зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки. Видно, что максимальная мощность для первой лопасти при скорости 4,5 м/с соответствует 7,2 мВт, для скорости 3,7 м/с – 5,5 мВт. Для второй лопасти максимальная мощность составляет 5,5 мВт на скорости 4,5 м/с.

Из графика 4.1(а) можно видеть, что использование большой лопасти при маленьких нагрузках примерно равных 60 Ом приводит к генерации максимальной мощности а маленькая лопасть вырабатывает максимальную мощность при сравнительно больших нагрузках соответствующих 250 Ом. Отсюда следует, что в зависимости от нагрузки можно выбрать лопасть.

4.2. Эксперимент с солнечной энергией

На рис. 4.2(а) и рис. 4.2(б) показаны зависимости зарядки конденсатора от ветра при скорости ветра 4 м/с. Ветер был сгенерирован вентилятором. Для измерения скорости был использован анемометр VOLTcraft (BL – 30). Рис. 4.2(а) иллюстрирует время, необходимое для зарядки суперконденсатора до 2,7 В при постоянной скорости ветра 4 м/с. Полная зарядка конденсатора требует около 20 часов. Рисунок 4.2(б) демонстрирует зарядку конденсатора в случае переменного ветра. Из графика видно, что заряд суперконденсатора может занять несколько дней.

Солнечная батарея, используемая для питания датчика, имеет напряжение холостого хода $U_{хх} = 2,2$ В и ток короткого замыкания $I_{кз} = 0,35$ А. Первичный литиевый элемент предназначен для использования в качестве резервного накопителя в тех случаях, когда суперконденсаты разряжены, а количество энергии, поступающей от альтернативных источников энергии, недостаточно для питания датчика.

На рис 4.3 (а) и (б) представлены кривые зарядки конденсатора от солнечной батареи. Сплошная кривая на рис. 4.3(а) показывает процесс зарядки конденсатора от солнечной батареи который проводился в один из солнечных дней в мае в Москве.

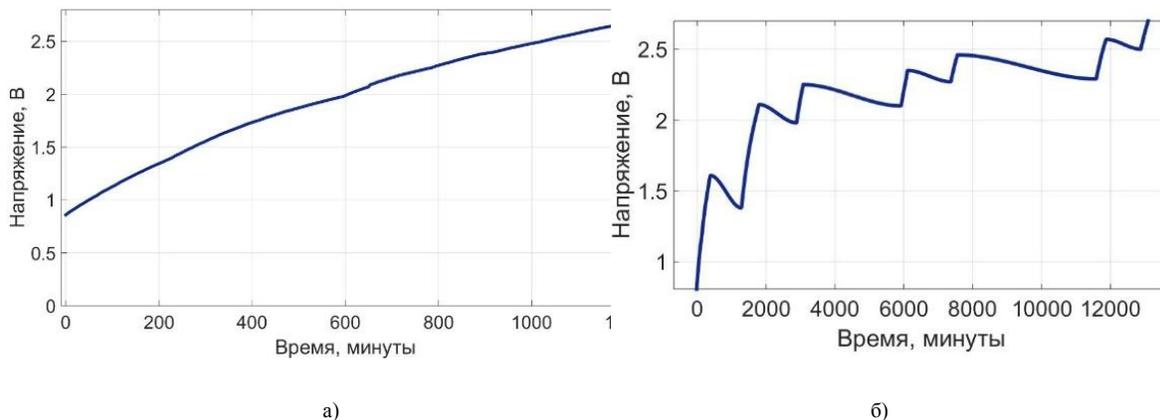


Рисунок 4.2 - зарядка суперконденсатора от ветрогенератора: (а) Непрерывная зарядка при скорости ветра 4 м/с; (б) Зарядка конденсатора в зависимости от ветра

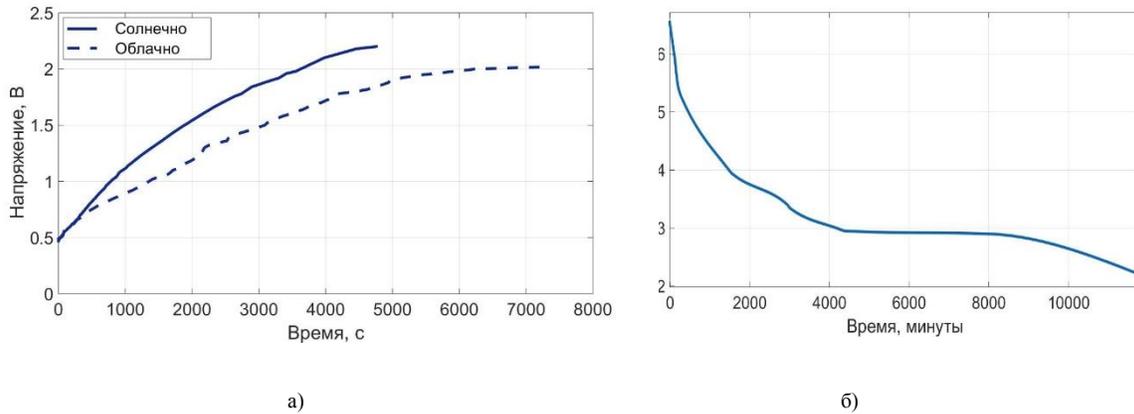


Рисунок 4.3 - (а) Зарядка суперконденсатора от солнечной панели; (б) саморазряд суперконденсатора в течение 6 дней

Из полученных данных видно, что для заряда конденсатора до напряжения 2,2 В требуется немногим более одного часа. Пунктирная кривая на рис. 4.3(а) показывает процесс зарядки конденсатора от солнечной батареи при переменной облачности, при этом время зарядки увеличивается. Отметим, что при экспериментах с солнечной батареей, не была измерена интенсивность излучения Солнца, поскольку необходимо было оценить реальное время зарядки.

На рис. 4.3(б) показано уменьшение напряжения на конденсаторе 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, запасенная в каждом суперконденсаторе, определяется уравнением:

$$W = \frac{C}{2} (V_{max} - V_{min}^2) \quad (4.1)$$

где V_{max} , V_{min} максимальное (2,7 В) и минимальное (0,9 В) значения напряжения, и C - емкость суперконденсатора.

При емкости суперконденсатора 400 Ф, количество запасенной энергии равно 1450 Дж, или 0,41 Вт*ч. Если конденсатор будет отключен при напряжении 0,9 В, то доступная для использования энергия составляет 1300 Дж, или 0,36 Вт*ч.

Напряжение переключения питания с литиевого элемента на альтернативные источники 0,9 В выбрано, исходя из следующих соображений. По своим техническим

параметрам ДС-ДС преобразователь должен стабилизировать напряжение на выходе, начиная с 0,3 В на входе.

Однако экспериментальные исследования показали, что при подаваемых напряжениях на ДС-ДС преобразователь ниже 0,9 В он не поддерживает стабилизированное напряжение 2,8 В на выходе. Это связано с тем, что энергии, запасенной в суперконденсаторе при напряжении меньшем, чем 0,9 В ($W=0,045$ Дж), недостаточно, чтобы обеспечить питание датчика. 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 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.

4.3. Автономная работа датчика угарного газа на основе питания от возобновляемых источников энергии

В качестве СО сенсора используется электрохимический сенсор NAP-505 (Nemoto, Япония), который работает в амперометрическом режиме проведения измерений. Принцип действия сенсора основан на том, что если к электродам приложить определенный потенциал, соответствующий окислению или восстановлению определяемого вещества, то сила тока в ячейке будет пропорциональна его концентрации. Для проведения точных амперометрических исследований и измерений в электрохимические сенсоры включают три электрода: рабочий, вспомогательный и сравнения. Электрод сравнения необходим для точного поддержания неизменным напряжения между рабочими электродами. Газ проникает внутрь сенсора через газопроницаемую мембрану и угольный фильтр, который удаляет неконтролируемые газы. Реакция взаимодействия происходит на трехфазной границе раздела электролит-газ –катализатор.

Для уменьшения энергопотребления датчика его работа и проведение измерений осуществляются в периодическом режиме (спящий режим - режим измерения). Алгоритм работы датчика представлен на рис. 4.4.

В спящем режиме питание аналоговой измерительной схемы полностью выключается с помощью МОП транзистора, а сам МК переходит в спящий режим работы. При этом снимается и напряжение, подаваемое на сенсор СО. В таком (периодическом) режиме измерений необходимо учесть одну особенность работы сенсора СО. После выхода из спящего режима для стабилизации выходного напряжения на рабочем электроде сенсору СО требуется 1-2 минуты. Поэтому длительность проведения измерений не может быть менее 2 минут. Однако если во время спящего режима замкнуть рабочий электрод и электрод сравнения, то период стабилизации напряжения уменьшается до 10 секунд. Замыкание рабочего электрода и электрода сравнения обеспечивает аналоговый переключатель. После выхода МК из спящего режима для проведения измерений он отдает команду на размыкание рабочего электрода и электрода сравнения.

При этом сам МК, чтобы не расходовать энергию, на 10 секунд возвращается в спящий режим работы. Через 10 секунд МК выходит из спящего режима и выполняет измерение



Рисунок 4.4 - алгоритм работы автономного беспроводного датчика CO

напряжения на рабочем электроде и проводит расчет концентрации CO. Далее цикл работы датчика CO повторяется. Таким образом, датчик практически все время находится в энергосберегающем режиме кроме случаев, когда измерения проводятся во время активации приемопередатчика. Во время передачи данных основным потребителем энергии является приемопередатчик. Необходимо отметить, что если концентрация газа CO меньше заданных пороговых значений, то нет необходимости отправлять данные на координатор сети. Это, в свою очередь, уменьшает потребление энергии.

Рисунки 4.4(a) иллюстрирует потребление тока беспроводным датчиком при проведении измерений концентрации CO и передаче данных. Рис. 4.4(б) показывает средний ток потребления, т.е. измерение CO и передачу данных координатору сети. Пик в потреблении тока наблюдается при получении или передаче данных. Пик тока, связанного с подключением или отключением рабочего и сравнительного электродов, не различается в данном временном масштабе, так как время переключения происходит в миллисекундах.

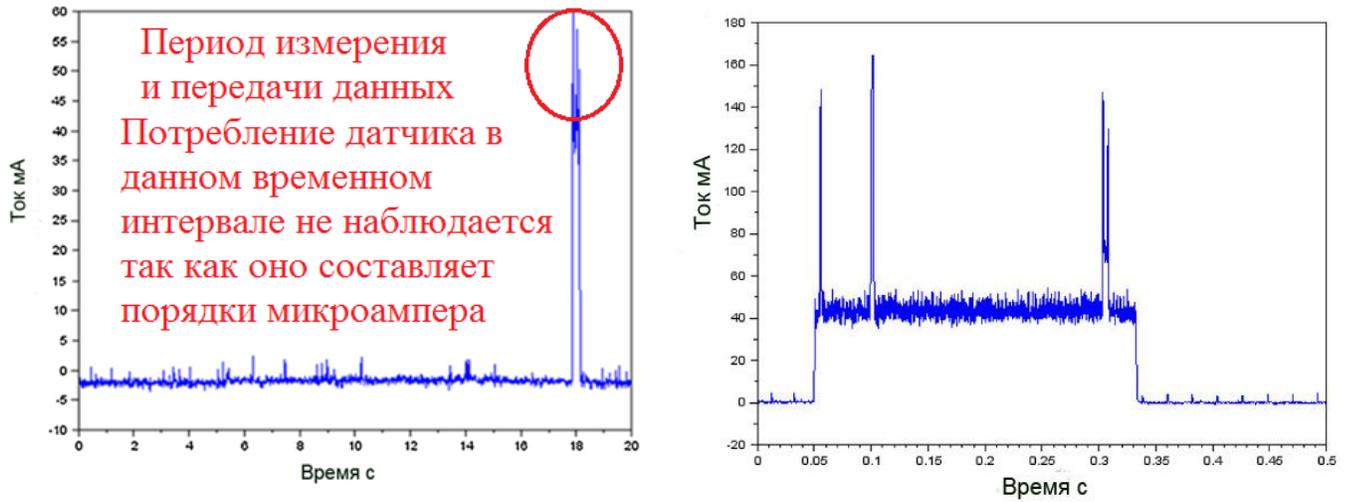


Рисунок 4.4 – (а) Потребление тока сенсорного модуля: измерительный режим; (б) Средний ток потребления (измерение и передача данных) составляет 43,49 мА в течение 0,28 с

Среднее потребление тока во время передачи данных составляет 43,49 мА в течение 0,28 с (рис. 4.4(б)). Таким образом, при одном измерении в минуту и последующей передаче данных среднее потребление тока датчиком будет порядка 0,2 мА.

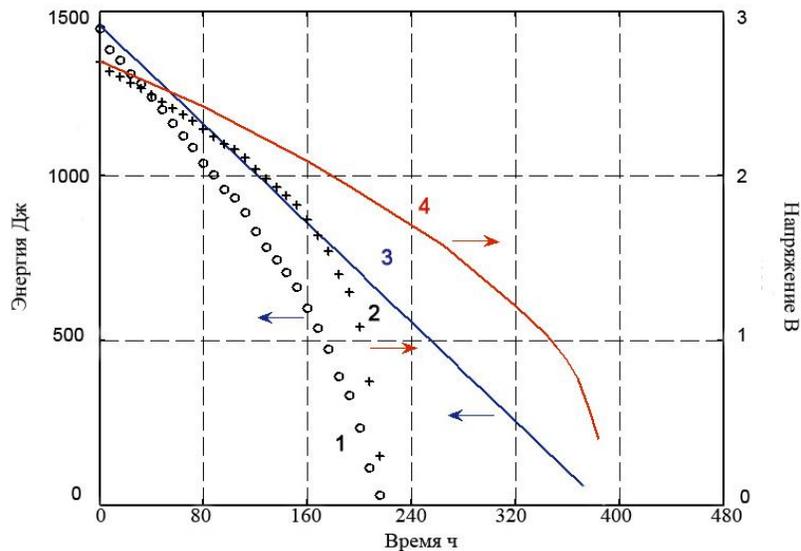


Рисунок 4.5 - теоретические (сплошные) и экспериментальные (точечные) кривые уменьшения запасенной энергии (цифры «1» и «3») в суперконденсаторе и напряжения на его обкладках (цифры «2» и «4») в зависимости от времени работы беспроводного датчика угарного газа.

Время автономной работы датчика на основе питания от первичного литиевого элемента (3,7 В 32000 мАч) составляет 21 месяц. На рис. 4.5 показаны теоретические и экспериментальные зависимости уменьшения энергии в конденсаторе и напряжения на его обкладках при работе датчика СО в случае полностью заряженного конденсатора ($U=2,7$ В). Разрядка суперконденсатора происходит намного быстрее (240 часов) по сравнению с ожидаемым теоретическим значением приблизительно равным 360 часам. Этот результат обусловлен как саморазрядом конденсатора, так и потерями в ДС-ДС преобразователе. ДС-ДС преобразователь имеет высокий КПД (около 90 %), если выполняет понижение напряжения. В случае повышения напряжения до 2,8 В КПД преобразования значительно ниже.

4.4. Автономная работа беспроводного датчика метана на основе питания от возобновляемых источников энергии

В качестве датчика метана был выбран каталитический сенсор фирмы ООО «НТЦ ИГД» который работает по схеме Уитстона [27]. Блок. схема представленная на рис. 4.6 включает в себя два сенсора: активный (R4) и сравнительный (R5) датчики. R1 и R2 являются резисторами имеющие сопротивление 1 кОм. Значение сопротивления R3 составляет 1 Ом. Указанный резистор подключен последовательно к мосту, чтобы измерить ток нагрева путем измерения его падения напряжения и применения закона Ома. Значения сопротивления активного и сравнительного датчиков при нормальных условиях соответствуют 12 Ом. Каталитические датчики обычно применяются для обнаружения концентрации газов в нижних пределах взрываемости.

Датчик имеет потребляемую мощность 150 мВт [27], [71]. Оба датчика (активный и сравнительный) должны нагреваться до температуры нагрева, т.е., 450°C при которой происходит сгорание газа. Чтобы удовлетворять это требование, необходимо подать датчику напряжение 2,8 В.

Напряжение нагрева регулируется цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) в микроконтроллере и выходным выпрямителем. Измерительная схема отключается МОП транзистором когда не осуществляется мониторинг окружающей среды.

Рисунок 4.7 демонстрирует ток потребления датчика в течение процедур нагрева, измерения и передачи данных. С увеличением температуры датчика, возрастает и его сопротивление. Это приведет к уменьшению тока нагрева при условии, что напряжение нагрева остается постоянным. Температура необходимая для нагрева датчика и обеспечения возможности осуществления измерения составляет 0,7 с.

Откликом датчика является напряжение между плечами мостовой схемы Уитстона которое меняется при присутствии метана. Далее микроконтроллер обрабатывает данные из датчика газа и переключает передатчик в активный режим (путем отправки ему AT команды) чтобы трансивер передал данные по unicast координатору (синяя часть на рис. 4.7). Чтобы гарантировать безотказную передачу данных, трансивер ожидает сигнал

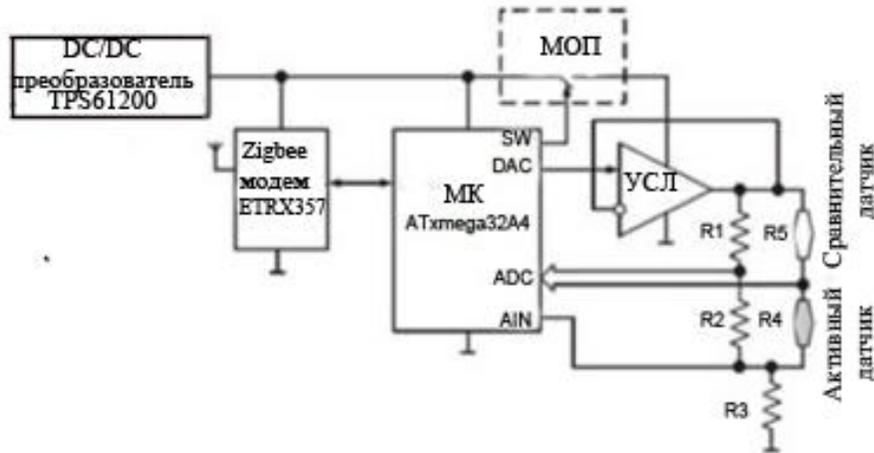


Рисунок 4.6 - блок схема сенсорного модуля

подтверждения от координатора. Как и в случае датчика CO, измерения проводятся периодически и для датчика метана они осуществляются раз в 15 с.

После завершения этапа передачи данных, сенсорный модуль переключается в энергосберегающий режим.

Потребляемая мощность сенсорного модуля в энергосберегающем режиме составляет порядок микроамперов. При этом режиме все модули и часы микроконтроллера отключаются кроме его RTC (т.е., часы реального времени) которые регулируются внешним 32,768 кГц кварцевым генератором. Прерывания генерируемые RTC используются для пробуждения микроконтроллера. После выхода из энергосберегающего режима повторяется цикл измерения.

Как раньше было указано, требуется напряжение 2,8 В для нагрева датчиков до температуры 450°C. Время нагрева для датчиков в схеме Уитстона составляет 0,7 с. Средний постоянный ток протекающий в течение периода нагрева равен 65 мА в результате чего потребляемая мощность датчика при непрерывном режиме измерения составляет 182 мВт.

Время работы датчика на основе питания от первичного литиевого элемента и без учета передачи данных вычисляется следующим образом:

$$(3,6 \text{ V} \times 18000 \text{ мАч}) / (180 \text{ мВт} \times 0,7 / 15 \text{ с}) = 7714 \text{ ч (или 321 день)} \quad (4.2)$$

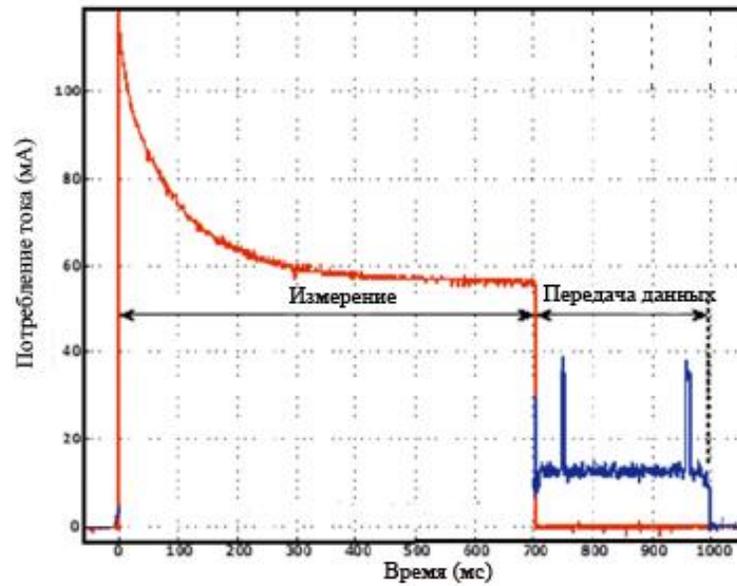


Рисунок 4.7 - потребление тока сенсорного модуля по обнаружению метана

Из рисунка 4.7 средний ток при передаче данных будет примерно 14,8 мА. Выражение 4.3 показывает время автономной работы:

$$(3,6 \text{ V} \times 18000 \text{ мАч}) / (180 \text{ мВт} \times 0,7/15 \text{ с} + 14,8 \times 0,3/15) \sim 7013 \text{ ч (или 292 дня)} \quad (4.3)$$

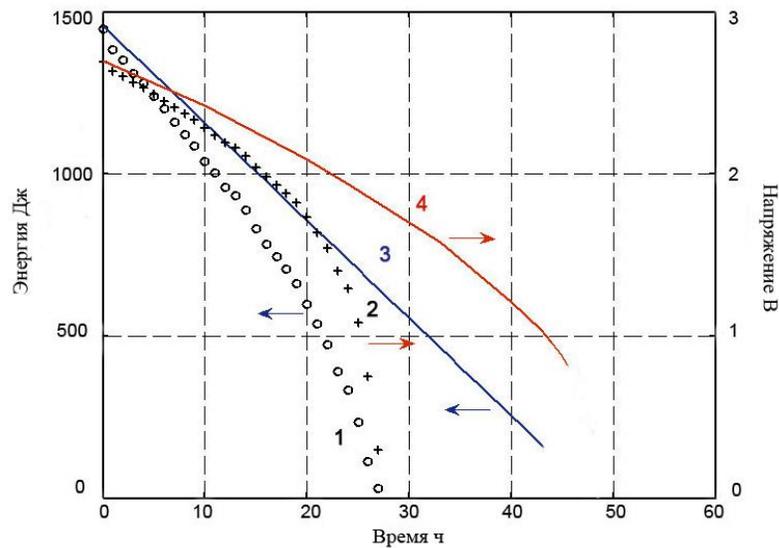


Рисунок 4.8 - теоретические (сплошные) и экспериментальные (точечные) кривые уменьшения запасенной энергии (цифры «1» и «3») в суперконденсаторе и напряжения на его обкладках (цифры «2» и «4») в зависимости от времени работы беспроводного датчика метана

В соответствии с уравнениями 4.1 и 4.2 и без учета передачи данных, время автономной работы беспроводного датчика метана при питании сенсора от возобновляемых источников энергии будет равно 43 часам. С учетом этапа передачи данных время автономной работы составляет 39 ч.

На рис. 4.8 показаны теоретические и экспериментальные зависимости уменьшения энергии в конденсаторе и напряжения на его обкладках при работе датчика метана в случае полностью заряженного конденсатора ($U=2,7$ В). Разрядка суперконденсатора происходит намного быстрее (28 часов) по сравнению с ожидаемым теоретическим значением приблизительно равным 43 часам. Как и в случае датчика CO, этот результат связан с саморазрядом конденсатора, так и потерями в ДС-ДС преобразователе.

ДС-ДС преобразователь имеет высокий КПД (около 90 %), если выполняет понижение напряжения. В случае повышения напряжения до 2,8 В КПД преобразования значительно ниже.

4.5. Перспектива применения энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии для питания беспроводных сенсорных сетей

Одной из областей где беспроводные датчики могут применяться считается нефтегазовая промышленность [72], [73], [74], [75]. Некоторые из нефтегазовых предприятий расположены в удаленных и неблагоприятных местах. По указанным причинам проводить кабельные линии для питания датчиков является сложным. При отсутствии питания от электрической сети, время работы беспроводных газовых датчиков ограничивается емкостью батарей. В большом нефтегазовом поле состоящего из огромного количества датчиков замена батарей может отнимать массу времени и эта процедура усложняется когда поле находится в местах характеризующихся выше указанными особенностями. Датчики для обнаружения горючих газов потребляют значительное количество энергии и это нужно учитывать когда беспроводная сеть создана для мониторинга газов такого типа. В последнем случае также становится все более ощутимым в поддержании стабильного источника питания. Для того, чтобы увеличить время автономной работы, одним вариантом является проектирование платформы которая может аккумулировать энергию от нескольких источников энергии окружающей среды. Солнечная и ветровая энергии могут присутствовать в большом количестве при задачах мониторинга в нефтегазовых полях. По этой причине устройство которое было разработано в данной работе, аккумулирует энергию от указанных источников энергии. Необходимо отметить, что выбор возобновляемого источника энергии зависит от задачи где датчики будут развертываться.

Другой аспект связан с применением устройств аккумуляции энергии в умных домах и обладает коммерческим характером. В умных домах может применяться большое количество датчиков для измерения разных параметров таких как температура, влажность, освещение, качество воздуха внутри помещения и т.д. Чтобы им обеспечить более автономный режим работы можно аккумулировать разные виды энергии существующей внутри здания. Например можно собирать энергию освещения внутри помещения или использовать энергию за счет разности температур.

4.6. Выводы

- Получены вольт амперная характеристика и зависимость мощности ветрогенератора от сопротивления нагрузки. Максимальная мощность для лопасти длиной 4,35 см при скорости 4,5 м/с соответствует 7,2 мВт (3), лопасти длиной 8,85 см составляет 5,5 мВт. Длина первой лопасти использованного при эксперименте составляет 4,35 см и второй 8,85 см. В результате эксперимента было установлено, что в зависимости от нагрузки можно выбрать лопасть.
- Проведены измерения по зарядке и разрядке суперконденсаторов. Зарядка суперконденсатора от солнечной панели осуществлялась при солнечной и облачной погодах. Зарядка суперконденсатора от ветрогенератора проводилась в двух режимах: непрерывная зарядка и зарядка конденсатора в зависимости от ветра.
- Экспериментальные исследования показали, что при подаваемых напряжениях на ДС-ДС преобразователь ниже 0,9 В он не поддерживает стабилизированное напряжение 2,8 В на выходе. Это связано с тем, что энергии, запасенной в суперконденсаторе при напряжении меньшем, чем 0,9 В ($W=0,045$ Дж), недостаточно, чтобы обеспечить питание датчика. Большая часть энергии, поступающей на вход ДС-ДС преобразователя, рассеивается в его схеме.
- Время автономной работы датчика угарного газа от одного полностью заряженного конденсатора составляет порядка 200 часов. Для датчика метана это время равняется 28 часам. Это связано с тем, что датчик метана имеет больше энергопотребления и измерения метана осуществляются по чаще (раз в 15 с) по сравнению с датчиком CO.
- Рассмотрены перспективы применения устройств сбора энергии от возобновляемых источников энергии. Предложена возможность применения разработанной энергоустановки в нефтегазовой промышленности, например, для трубопроводных сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Разработана новая высоко-эффективная энергоустановка по аккумулярованию энергии от возобновляемых источников энергии. Разработанная энергоустановка состоит из устройства сбора энергии (ветрогенератора и солнечной панели), двух суперконденсаторов, 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 В...5,5 В, что соответствует напряжениям генерируемым солнечной панелью и ветрогенератором. Более того, указанный преобразователь вырабатывает ток необходимый для работы датчиков СН₄ с эффективностью 90%, для датчика СО 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 максимум. 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 CH₄.
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.

Список литературы

1. Somov A., Baranov A., Savkin A., Ivanov M., Calliari L., Passerone R., Karpov E., and Suchkov A., Energy-Aware Gas Sensing Using Wireless Sensor Networks // in Wireless Sensor Networks Series: Lecture Notes in Computer Science, Edited by Gian Pietro Picco, Wendi Heinzelman, Berlin Heidelberg: Springer, 2012, pp.245-260.
2. Iyer Aravind, Kulkarni Sunil S., Mhatre Vivek, Rosenberg Catherine P., A Taxonomy – Based Approach to Design of Large Scale Sensor Networks // Wireless Sensor Networks and Applications, Edited by Yingshu Li, My T. Thai, Springer Science & Business Media, 2008, p. 3.
3. Obaidat Mohammad S., Misra Sudip, Principles of Wireless Sensor Networks, Cambridge University Press, 2014. - 433 Pages.
4. How to Think About the Internet of Things (IoT) [Электронный документ]. Режим доступа: <http://micrium.com/iot/devices/> (дата обращения: 18.10.2015)
5. Buratti Chiara, Martalo Marco, Verdone Roberto, Ferrari Gianluigi, Sensor Networks with IEEE 802.15.4 Systems: Distributed Processing, MAC, and Connectivity, Springer Science & Business Media, 2011. - 250 Pages.
6. Vasseur Jean-Philippe, Dunkel Adam, Interconnecting Smart Objects with IP: The Next Internet, Morgan Kaufmann, 2012. - 432 Pages.
7. Yang Shuang-Hua, Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications, Springer Science & Business Media, 2013. - 293 Pages.
8. Dardari Davide, Falletti Emanuela, Luise Marco, Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques: A Signal Processing Perspective, Academic Press, 2012. - 432 Pages.
9. Farahani Shahin, ZigBee Wireless Networks and Transceivers, Newnes, 2011. – 360 Pages.
10. Espina Javier, Falck Thomas, Mühlens Oliver, Zigbee // Body Sensor Networks, Edited by Guang-Zhong Yang, Springer-Verlag London Limited, 2006, p. 165.
11. Akyildiz Ian F., Can Vuran Mehmet, Wireless Sensor Networks, John Wiley & Sons, 2012. – 520 Pages.

12. Labrador Miguel A., Wightman Pedro M.. Topology Control in Wireless Sensor Networks: with a companion simulation tool for teaching and research, Springer Science & Business Media, 2009. – 209 Pages.
13. Dishongh Terrance J., McGrath Michael, Wireless Sensor Networks for Healthcare Applications, Artech House, 2010. – 246 Pages.
14. Abdelgawad Ahmed, Bayoumi Magdy, Resource-Aware Data Fusion Algorithms for Wireless Sensor Networks, Springer Science & Business Media, 2012. – 108 Pages.
15. Baranov Alexander, Spirjakin Denis, Akbari Saba, Somov Andrey, Passerone Roberto. POCO: ‘Perpetual’ operation of CO wireless sensor node with hybrid power supply // Sensors and Actuators A: Physical, volume 238, 2016. – Pages 112 – 121.
16. Magno Michele, Boyle David, Brunelli Davide, O’Flynn Brendan, Popovici Emanuel, Benini Luca. Extended Wireless Monitoring Through Intelligent Hybrid Energy Supply (Brunelli) // IEEE Transactions on Industrial Electronics, volume 61, 2014. – Pages 1871 – 1881.
17. Husain Iqbal, Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, Second Edition, CRC Press, 2011. – 523 Pages.
18. Catalytic Combustible Gas Sensors [Электронный ресурс] Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. / Режим доступа: <http://www.intlsensor.com/pdf/catalyticbead.pdf> (дата обращения: 27.01.2016).
19. Figaro Engineering INC [Электронный документ]. / Режим доступа: <http://www.figaro.co.jp/en/technicalinfo/principle/mos-type.html> (дата обращения: 27.01.2016).
20. Zhang Yu, Gao Wenzhu, Song Zhenyu, An Yupeng, Li Li, Song Zhanwei, Yu William W., Wang Yiding. Design of a novel gas sensor structure based on mid-infrared absorption spectrum // Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 147, Issue 1, 2010. Pages 5–9.
21. Gas Detection Handbook Fifth Edition, Mine Safety Appliances Company [Электронный ресурс] Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. / Режим доступа: <http://www.gilsoneng.com/reference/gasdetectionhandbook.pdf> (дата обращения: 27.01.2016).
22. Electrochemical Sensors [Электронный ресурс] Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. / Режим доступа: <http://www.intlsensor.com/pdf/electrochemical.pdf> (дата обращения: 04.02.2016).

23. FIGARO - TGS 813 - For the Detection of Combustible Gases [Электронный ресурс] Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. / Режим доступа: <http://www.figarosensor.com/products/813pdf.pdf> (Дата обращения: 01.04.2016).
24. Nemoto Sensor Engineering Company Ltd - Operating Characteristics and Handling Manual for the NAP-66A Explosive/Flammable Gas Sensor [Электронный ресурс] Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. / Режим доступа: <http://www.nemoto.eu/nap-66a-manual.pdf> (дата обращения 05.04.2016).
25. HANWEI Electronics CO., LTD, MC Series Catalytic (Hot Wire) Gas Sensor [Электронный ресурс] Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. / Режим доступа: <http://www.domko.ru/pdf/pdf/m/mc101.pdf>, (дата обращения: 07.04.2016).
26. Карпов Е.Е., Карпов Е.Ф., Suchkov A., Mironov S., Baranov A., Sleptsov V., Calliari L. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement // Sensors and Actuators A: Physical, Volume 194, 2013. - Pages 176–180.
27. Moon S. E., Lee H.-K., Choi N.-J., Lee J., Choi C.A., Yang W.S., Kim J., Jong J.J., Yoo D.-J. Low power consumption micro C₂H₅OH gas sensor based on micro-heater and screen printing technique // Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 187, 2013. - Pages 598–603.
28. Lee E.B., Hwang I.S., Cha J.H., Lee H.J., Lee W.B., Pak J.J., Lee J.H., Ju B.K.. Micromachined catalytic combustible hydrogen gas sensor // Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 153, Issue 2, 2011. - Pages 392–397.
29. Bhattacharyya P., Basu P., Mondal B., Saha H. A low power MEMS gas sensor based on nanocrystalline ZnO thin films for sensing methane // Microelectronics Reliability, Volume 48, Issues 11-12, 2008. - Pages 1772–1779.
30. Suzuki T., Kunihara K., Kobayashi M., Tabata S., Higaki K., Ohnishi H. A micromachined gas sensor based on a catalytic thick film/SnO₂ thin film bilayer and thin film heater Part 1: {CH₄} sensing // Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 109, Issue 2, 2005. – Pages 185–189.
31. Zhou Q., Sussman A., Chang J., Donga J., Zettl A., Mickelson W. Fast response integrated MEMS microheaters for ultra low power gas detection // Sensors and Actuators A: Physical, Volume 223, 2015. – Pages 67 – 75.

32. Vasiliev A.A., Pavelko R.G., Gogish-Klushin S. Yu., Kharitonov D. Yu., Gogish-Klushina O.S., Sokolov A.V., Pislakov A.V., Samotaev N.N. Alumina MEMS platform for impulse semiconductor and IR optic gas sensors // *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 132, Issue 1, 2008. – Pages 216–223.
33. Ma H., Ding E., Wang W. Power reduction with enhanced sensitivity for pellistor methane sensor by improved thermal insulation packaging // *Sensors and Actuators B: Chemical* 187, Volume 187, 2013. - Pages 221–226.
34. Haridas D., Gupta V. Enhanced response characteristics of SnO₂ thin film based sensors loaded with Pd clusters for methane detection // *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volumes 166–167, 2012. - Pages 156–164.
35. Korotcenkov G., Cho B.K. Engineering approaches to improvement of conductometric gas sensor parameters. Part 2: Decrease of dissipated (consumable) power and improvement stability and reliability // *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 198, 2014. - Pages 316–341.
36. Ali S.Z., De Luca A., Racz Z., Tremlett P., Wotherspoon T., Gardner J.W., Udrea F. Low power NDIR CO₂ sensor based on CMOS IR emitter for boiler applications // *IEEE Sensors 2014*, 2-5 Nov. 2014, pp. 934- 937.
37. Gibson Desmond, MacGregor Calum. A Novel Solid State Non-Dispersive Infrared CO₂ Gas Sensor Compatible with Wireless and Portable Deployment // *Sensors*, Volume 13, Issue 6, 2013. – Pages 7079-7103.
38. Li Haitao, Mu Xiaoyi, Yang Yuning, Mason Andrew J. Low Power Multimode Electrochemical Gas Sensor Array System for Wearable Health and Safety Monitoring // *IEEE Sensors Journal*, Volume 14, Issue 10, 2014. – Pages 3391 – 3399.
39. Makeenkov, A., Lapitskiy, I., Somov, A., Baranov, A. Flammable gases and vapors of flammable liquids: Monitoring with infrared sensor node // *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 209, 2015. - Pages 1102-1107.
40. Spirjakin Denis, Baranov Alexander M., Sleptsov Vladimir. Design of Smart Dust Sensor Node for Combustible Gas Leakage Monitoring // *Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, 13-16 Sept. 2015, pp. 1279 – 1283.

41. Basagni S., Naderi M.Y., Petrioli C. and Spenza D. Wireless Sensor Networks With Energy Harvesting. // *Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions*, Edited by Stefano Basagni, Marco Conti, Silvia Giordano, Ivan Stojmenovic, Wiley-IEEE Press 2013, p.12.
42. Mathna C., Donnell T.O., Martinez-Catala R.V., Rohan J., Flynn B.O. Energy scavenging for long -term deployable wireless sensor networks // *Talanta*, Volume 75, Issue 3, 2008. - Pages 613–623.
43. Raju M., Grazier M., Energy Harvesting – ULP meets energy harvesting: A game changing combination for desing engineers [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. Режим доступа: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/wp/slyy018a/slyy018a.pdf> (дата обращения: 10.04.2016).
44. Akbari S. Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks Review // *Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, 7-10 Sept. 2014, pp. 987-992.
45. Khosro Pour Naser, Krummenacher François, Kayal Maher. A miniaturized autonomous microsystem for hydrogen gas sensing applications // *IEEE 10th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, 17-20 Jun. 2012, pp. 201- 204.
46. Rizzon Luca, Rossi Maurizio, Passerone Roberto, Brunelli Davide. Wireless sensor networks for environmental monitoring powered by microprocessors heat dissipation // *The 1st International Workshop on Energy Neutral Sensing Systems ENSSys '13*, 11-14 Nov. 2013.
47. Alippi Cesare, Camplani Romolo, Galperti Cristian, Roveri Manuel. A Robust, Adaptive, Solar-Powered WSN Framework for Aquatic Environmental Monitoring // *IEEE Sensors Journal*, Volume 11, Issue 1, 2011. - Pages 45 – 55.
48. Frezzetti A., Manfredi S., Pagano M. An implementation of a smart maximum power point tracking controller to harvest renewable energy of wireless sensor nodes // *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 11-13 June 2013, pp. 503 – 508.
49. Kim Hoonki, Min Young-Jae, Jeong Chan-Hui, Kim Kyu-Young, Kim Chulwoo, Kim Soo-Won. A 1-mW Solar-Energy-Harvesting Circuit Using an Adaptive MPPT With a SAR and a Counter // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, Volume. 60, Issue 6, 2013. - Pages 331 – 335.

50. Maximizing the Output from Solar Modules. // [Электронный документ] Digi – Key. Режим доступа: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/dec/maximizing-the-output-from-solar-modules> (дата обращения: 21.02.2016).
51. Pan C.T., Liu Z.H., Chen Y.C. Study of broad bandwidth vibrational energy harvesting system with optimum thickness of PET substrate // *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 12, Issue 3, 2012. – Pages 684 – 696.
52. Andò B., Baglio S., Maiorca F., Trigona C. Analysis of two dimensional, wide-band, bi-stable vibration energy harvester // *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 202, 2012. – Pages 176 – 182.
53. Samson D., Kluge M., Becker Th., Schmid U. Wireless sensor node powered by aircraft specific thermoelectric energy harvesting // *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 172, Issue 1, 2011. – Pages 240 – 244.
54. Salerno David, Ultralow Voltage Energy Harvester Uses Thermoelectric Generator for Battery-Free Wireless Sensors // *Journal of Analog Innovation*, Volume 20, Number 3, 2010. – Pages 1-11.
55. Moczygemba Joshua, Energy Harvesting TEG Power Strap for Industrial, Chemical, Oil and Gas Applications [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader, Режим доступа: http://www.marlow.com/media/marlow/images/support_guide/EverGen_Power_Strap_White_Paper.pdf (дата обращения: 05.03.2016).
56. Vyas Rushi, Nishimoto Hiroshi, Tentzeris Manos, Kawahara Yoshihiro, Asami Tohru. Battery-Less, Energy Harvesting Device for Long Range Scavenging of Wireless Power from Terrestrial TV Broadcasts // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 17-22 June 2012, pp. 1-3.
57. Pinson P., Giebel G., Clausen N.E. Renewable Energy Resources – Onshore/Offshore Wind Energy // *Climate Vulnerability : Understanding and Addressing Threats to Essential Resources*, Edited by Roger Pielke, Elsevier Science, 2013, pp. 53 – 64.
58. Park J.W., Jung H.Jo., Jo H. and Spencer Jr. B. F. Feasibility Study of Micro-Wind Turbines for Powering Wireless Sensors on a Cable-Stayed Bridge // *Energies*, Volume 5, Issue 9, 2012. – Pages 3450-3464.

59. Weddell Alex S., Magno Michele, Merrett Geoff V., Brunelli Davide, Al-Hashimi Bashir M., Benini Luca, A survey of multi-source energy harvesting systems // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 18-22 March 2013, pp. 905 – 908.
60. Baranov Alexander, Spirjakin Denis, Akbari Saba, Somov Andrey. Optimization of power consumption for gas sensor nodes: A survey // Sensors and Actuators A: Physical, Volume 233, 2015. – Pages 279 – 289.
61. Ma Dongsheng, Bondade Rajdeep. Reconfigurable Switched-Capacitor Power Converters: Principles and Designs for Self-Powered Microsystems, Springer Science & Business Media, 2012. - 178 Pages.
62. Erickson Robert W., DC-DC Power Converters [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. / Режим доступа: <http://web.eecs.utk.edu/~dcostine/ECE482/Spring2016/materials/DCPowerConv.pdf> (дата обращения: 14.04.2016).
63. Williamson Sheldon S. Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles, Springer Science & Business Media, 2013. – 253 Pages.
64. LTC3388-1/LTC3388-3 20 V High Efficiency Nanopower Step-Down Regulator [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. / Режим доступа: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/338813fa.pdf> (дата обращения: 14.04.2016)
65. Emadi Ali, Khaligh Alireza, Nie Zhong, Lee Young Joo. Integrated Power Electronic Converters and Digital Control, CRC Press, 2009. – 350 Pages.
66. Erlbacher Tobias. Lateral Power Transistors in Integrated Circuits, Springer, 2014. – Pages 223.
67. TPS6120x Low Input Voltage Synchronous Boost Converter With 1.3-A Switches [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. / Режим доступа:, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61200.pdf> (дата обращения: 15.04.2016).
68. TPS6300 High Efficient Single Inductor Buck – Boost Converter with 1.8 –A Switches [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. / Режим доступа: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=tps63001&file-Туре=pdf> (дата обращения: 15.04.2016).
69. Bindra Ashok, Buck-Boost DC/DC Handles Wide Input-Voltage Range // [Электронный документ] Digi - Key. Режим доступа: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/jul/buck-boost-dcdc-handles-wide-input-voltage-range> (дата обращения: 15.04.2016).

70. AVR042.Рекомендации по схемотехническому проектированию на микроконтроллерах AVR // [Электронный документ]. Режим доступа: <http://avrdoc.narod.ru/index/0-3> (дата обращения 03.05.2016).
71. Somov, A., Baranov, A., Suchkov, A., Karelin, A., Mironov, S., Karpova, E. Improving interoperability of catalytic sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical* // Volume 221, 2015. - Pages 1156–1161.
72. Somov Andrey, Baranov Alexander, Spirjakin Denis, Spirjakin Andrey, Sleptsov Vladimir, Passerone Roberto. Deployment and evaluation of a wireless sensor network for methane leak detection // *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 202, 2012. - Pages 217–225.
73. Aliyu Farouq, Al-shaboti Mohammed, Garba Yau, Sheltami Tarek, Barnawi Abdulaziz, Morsy Mohammed A. Hydrogen Sulfide (H₂S) Gas Safety System for Oil Drilling Sites using Wireless Sensor Network // *The 6th International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks (EUSPN 2015)/ The 5th International Conference on Current and Future Trends of Information and Communication Technologies in Healthcare (ICTH-2015)/ Affiliated Workshops*, 27-30 Sept. 2015, pp. 499-504.
74. Yu Huaping, Guo Mei. An efficient oil and gas pipeline monitoring systems based on wireless sensor networks // *International Conference on Information Security and Intelligence Control (ISIC)*, 14-16 Aug. 2012, pp. 178 - 181.
75. Anupama K. R., Kamdar Nishad, Kamalampet Santosh Kumar, Vyas Dhruv, Sahu Sidharth, Shah Supan. A wireless sensor network based pipeline monitoring system // *International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 20-21 Feb. 2014, pp. 412 – 419.