

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт. Энергетический факультет
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующая кафедрой

_____ И.М. Кирпичникова
(подпись)

« ____ » _____ 2020 г.

Оптимизация процесса отбора мощности ветроэнергетической установки с
вертикальной осью вращения

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ - 13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель
профессор, д.т.н.

_____ Соломин Е.В.
« ____ » _____ 2020г.

Автор
Студент группы П-288

_____ Гапоненко А.Ю.
« ____ » _____ 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Гапоненко Оптимизация процесса отбора мощности ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения. - Челябинск, ЮУрГУ, Э; 2020, 129 с, 11 ил., 11 табл., библиогр. список - 55 наим., 11 прил.

Задача данной выпускной квалификационной работы заключается в изучении методов оптимизации процесса отбора мощности ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения с применением программируемого микроконтроллера.

В первом разделе выпускной квалификационной работы рассматриваются основополагающие аспекты теории, которые требуется принимать во внимание при осуществлении разработки программного обеспечения для микроконтроллера, проводится анализ исходных данных. Второй раздел содержит в себе выполнение разработки структурной схемы автономной энергетической системы очень малой мощности с целью проведения оценки входных параметров, обрабатываемых микроконтроллером; выбор подходящего микроконтроллера и обоснование его выбора; выбор программных продуктов и средств для разработки программы; конфигурирование периферийной части микроконтроллера; проведение анализа необходимых действий, осуществляющихся при обработке входного потока данных в виде массива; построение оптимального алгоритма работы микроконтроллера и его реализация в виде программного кода. Третий раздел данной работы описывает метод экспериментальной проверки программного кода на выбранной отладочной плате. В четвертом разделе описаны организационные методы по разработке программы и настройке оборудования с помощью методики сетевого планирования. Также осуществлён расчёт основных показателей эффективности. В пятом разделе рассмотрены основные опасные факторы, которые возникают в процессе эксплуатации ветроэнергетической установки

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ						
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Оптимизация процесса отбора мощности ветроэнергетической установки с вертикальной			Лит.	Лист	Листов	
Разраб.	Гапоненко			В				К	Р	3	129
Пров.	Соломин			ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ) Кафедра «ЭССиСЭ»							
.											
Утв.	Кирпичникова										

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	10
1.1 Определение и основные виды ветроэнергетических установок.....	10
1.2 Алгоритмы цикла заряда-разряда свинцово-кислотных аккумуляторов..	20
1.3 Алгоритм капельного заряда литий-ионных батарей.....	26
1.4 Методы осуществления поиска точки максимальной мощности.....	30
1.5 Методы, применяемые для торможения ветроколеса.....	33
1.6 Методы управления мощностью ветровых энергоустановок.....	35
1.6.1 Способ управления мощностью при постоянной частоте вращения.....	37
1.6.2 Управление мощностью ступенчатым изменением частоты вращения ветроколеса путём переключения обмоток генератора.....	39
1.6.3 Управление мощностью ВЭУ методом изменения передаточного отношения редуктора-мультипликатора ветродвигателя.....	40
1.6.4 Управление мощностью ВЭУ путём изменения установочного угла лопастей или геометрических размеров ветроколеса.....	41
1.6.5 Функционирование ветроэнергетической установки при переменной частоте вращения ветроколеса.....	42
Выводы по разделу 1.....	43
2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В ПРОГРАММНОМ ВИДЕ.....	45
2.1 Формирование структурной схемы энергосистемы.....	45
2.2 Характеристики микроконтроллерного устройства и обоснование его выбора.....	55

2.3 Обзор программного обеспечения, необходимого при разработке программы микроконтроллера.....	59
2.4 Конфигурирование периферии микроконтроллера в программе STM32CubeMX.....	62
2.5 Обработка входного массива данных для получения действительных измеряемых значений.....	66
2.6 Отображение информации и пользовательская корректировка изначально заданных значений.....	69
2.7 Разработка алгоритма работы в программном виде.....	71
Выводы по разделу 2.....	78
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ.....	80
3.1 Характеристика и параметры платы STM32F4Discovery.....	80
3.2 Макет эмуляции датчиков, используемых в автономной энергосистеме на основе ВЭУ.....	81
3.3 Проверка правильности работы алгоритма.....	82
Выводы по разделу 3.....	84
4 РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.....	85
4.1 Сетевое планирование проекта энергетической системы.....	85
4.2 Технико-экономические расчёты проекта.....	91
Выводы по разделу 4.....	96
5 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	98
Выводы по разделу 5.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	103
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	104

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АВТОНОМНОЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЭУ110

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ИЗОБРАЖЕНИЕ ОКНА ПРОГРАММЫ
STMF4CUBEMX В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ.....111

ПРИЛОЖЕНИЕ В. БЛОК-СХЕМЫ ОСНОВНЫХ АЛГОРИТМОВ
РАБОТЫ..... 113

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ЛИСТИНГ ПРОГРАММНОГО КОДА АЛГОРИТМА
ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА D НА ЯЗЫКЕ RUST.....117

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. СХЕМА МАКЕТА, СЛУЖАЩЕГО ДЛЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ ПРАВИЛЬНОЙ РАБОТЫ
АЛГОРИТМА.....127

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. СЕТЕВОЙ ГРАФИК ПРОЕКТА.....129

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире человеческое общество не способно продуктивно осуществлять свою жизнедеятельность без такого достижения технического прогресса как электроэнергия. В данный момент преобладающая выработка электрической энергии человеческим обществом достигается за счёт применения ископаемых источников энергии (уголь, нефть, газ, торф и некоторые другие виды топлива). Данная разновидность топливных ресурсов имеет высокое значение удельной энергии сгорания. Такая характеристика позволяет осуществить получение электрической энергии в больших объёмах. Однако в нынешнее время наблюдается планомерный рост доли источников электроэнергии, которые не используют ископаемое топливо - возобновляемых источников энергии (ВИЭ). К ним относятся источники, которые получают энергию из водных потоков, лучистая энергия солнца, энергия ветровых потоков и другие. К основным причинам роста количества энергии, получаемой с применением возобновляемых источников энергии, относятся: исчерпаемость ископаемых топливных ресурсов, нестабильность их цен на мировом рынке, экологические проблемы, связанные с добычей ископаемых ресурсов, их дальнейшей переработкой, последствия, которые появляются при осуществлении сжигания углеводородного топлива, а также сложность транспортировки электрической энергии в отдаленные и труднодоступные районы, или же трудность поставки топливных ресурсов.

Ветроэнергетическая сфера энергетики является одной из самых перспективных отраслей. Это подтверждается определенными показателями. Таким образом, установленная мощность всех ветровых энергоустановок в мире в 2012 году, по данным WWEA (World Wind Energy Association), составляла 196630 МВт, а к началу июня 2019 года - 597000 МВт [1], что показывает прирост энергии, генерируемой при помощи ветра в мире, в 3 раза. При этом наблюдается ежегодный прирост установленной мощности ветроэнергетических установок. Так с 2018 года по июнь 2019 года прирост составил - 50,1 ГВт [1].

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		7

Отдельное развитие в нынешний период времени продолжает получать малая ветроэнергетика. Данное направление ветроэнергетики характеризуется применением ветроэнергетических установок мощностью от 5 до 99 кВт (ВЭУ малой мощности) [2]. В малой ветроэнергетике подразумевается, что ветроэнергетические установки располагаются в непосредственной близости к потребителю. При этом подразумевается частичный или полный отказ от использования внешней сети линий электропередачи. Данная концепция генерации электрической энергии носит название распределенная энергетика. Она обладает множеством преимуществ, среди которых, существенное снижение уровня потерь при передаче электрической энергии, независимость генерации электроэнергии, высокая надежность при наличии в системе нескольких генераторов электрической мощности.

Таким образом, малые ВЭУ чаще всего устанавливаются непосредственно возле потребителя, однако качество получаемой энергии может быть существенно ниже, чем у крупных ветроэнергетических установок по причине непостоянности скорости ветра и его направления, из-за наличия завихрений вследствие близости поверхности земли и др.). Вследствие этого возникает проблема максимально эффективного отбора мощности у ветрового потока. Для осуществления эффективного отбора мощности и контроля текущих параметров ветрового колеса ВЭУ (скорость ветроколеса, момент вращения) и параметров генератора (величина температуры обмоток, значение тока обмотки и пр.) применяются управляющие устройства. В зависимости от структуры системы ветроэнергетической установки они могут обладать различным функционалом и управлять разного рода периферийными устройствами несколькими способами. Как правило в качестве управляющих устройств применяются микроконтроллеры, либо полноценные микрокомпьютеры (например, одноплатные компьютеры серии Raspberry Pi).

Современные микроконтроллерные устройства обладают достаточно обширным перечнем функций и широким диапазоном возможностей для обеспечения контроля работы ВЭУ. Помимо этого, различные программные

средства разработки и отладки способны обеспечить реализацию алгоритмов управления с помощью определённых устройств. При этом главным преимуществом применения микроконтроллеров по сравнению с одноплатными и персональными компьютерами является их надёжность и относительная низкая стоимость

Таким образом, выбранная тема выпускной квалификационной работы является актуальной.

Целью данной работы является составление алгоритма и его реализация в программном виде для выполнения процесса эффективного отбора электрической мощности у ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения и передачи этой мощности потребителю с возможностью накопления энергии.

Задачами данной выпускной квалификационной работы являются:

- рассмотреть теорию систем управления ветроэнергетическими установками;
- разработать структурную схему и составить алгоритм управления автономной энергетической системы, использующей ветроэнергетическую установку в качестве источника возобновляемой электрической энергии;
- реализовать программный код на языке Rust для микроконтроллера STM32F407VGT6 и выполнить его реализацию с помощью платы STM32F4Discovery;
- выполнить экспериментальную проверку правильности функционирования алгоритма;
- составить сетевой график работ проекта, произвести оценку его параметров, рассчитать срок окупаемости проекта;
- оценить потенциально возможные опасные факторы, которые возникают при эксплуатации ветроэнергетической установки, составить перечень необходимых действий для обеспечения безопасности функционирования в соответствии с требованиями ГОСТ.

В работе использована теория и методология по вопросам алгоритмов управления ВЭУ, составления программного кода на языке программирования

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		9

Rust, техническая документация и спецификация микроконтроллера STM32F407VGT6 и платы STM32F4Discovery.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		10

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

1.1 Определение и основные виды ветроэнергетических установок

Ветровая энергетическая установка (ВЭУ) представляет собой комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначение которого заключается в осуществлении преобразования энергии потоков ветра в другие виды энергии (тепловую, механическую, электрическую и др.) [3].

В основе работы каждой ветроэнергетической установки заложено использование перемещающихся воздушных масс, или потоков ветра. Ветровой поток возникает по причине неравномерного нагрева поверхности планеты солнечным излучением, и, возникающей вследствие этого разницы давлений в различных областях, и появления конвективных течений. Поэтому справедливо утверждать, что энергия ветра возникает по причине процесса преобразования энергии солнечного излучения в кинетическую энергию потоков воздушных масс. В планетарном масштабе на эти явления термического характера накладывается влияние вращающегося движения Земли, которое способствует появлению преобладающих направлений ветровых потоков [4].

Ветровой поток характеризуется наличием непостоянства скорости и направлению. Однако, на планете встречаются зоны, где ветер сохраняет постоянство скорости и направления либо в течение определенного сезона, либо в течение всего года. В таких областях размещение ветровых энергоустановок является наиболее выгодным и оптимальным.

Ветер также изменяется в зависимости от высоты над земной поверхностью. Вблизи земли скорость ветра снижается ввиду возникновения трения между слоями потоков воздуха и землей. Кроме того, вблизи поверхности земли наблюдаются завихрения воздушных потоков. Скорость ветра существенно подвержена снижению и при наличии различных преград искусственного (здания

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		11

и сооружения), либо естественного характера (холмы, горы и др.). Вследствие этого требуется располагать ветроэнергетические установки на определенной высоте от поверхности земли.

Одним из важнейших требований при проектировании ветровых энергоустановок является обеспечение их защиты от разрушительного воздействия очень сильных случайных порывов ветра. Поэтому ветроэнергетические установки следует разрабатывать с очень большим запасом прочности [4].

Согласно ГОСТ Р 51990-2002 ветровые энергоустановки классифицируют:

- по виду вырабатываемой энергии;
- по мощности;
- по областям применения;
- по назначению;
- по признаку работы с постоянной или переменной частотой вращения ветроколеса;
- по способам осуществления управления;
- по структуре системы генерирования энергии.

По характеру вырабатываемой энергии ветровые энергоустановки подразделяются на механические и электрические. Электрические ветроэнергетические установки подразделяют на установки постоянного и переменного тока.

По величине мощности ветроэнергетические установки классифицируют следующим образом:

- большой мощности - свыше 1 МВт;
- средней мощности - от 100 кВт до 1 МВт;
- малой мощности - от 5 до 99 кВт;
- очень малой мощности - менее 5 кВт.

По назначению ВЭУ классифицируются:

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		12

– автономные – источники электропитания, не связанные с электроэнергетической сетью, отличающиеся сравнительно низкими значениями коэффициента использования установленной мощности;

– гибридные (работа ВЭУ параллельно с независимыми электростанциями соизмеримой мощности (дизель-генераторы, малые ГЭС и др.)) – источники электропитания для бесперебойного снабжения потребителей электрической энергией номинальной мощности;

– сетевые (работа ВЭУ параллельно с мощной электрической сетью) – источники получения и генерации в электроэнергетическую сеть максимально возможной выработанной электроэнергии.

Существуют следующие способы управления ветроэнергетическими установками:

- путём регулирования ветрового колеса;
- регулирование с помощью балластных сопротивлений;
- регулирование посредством преобразователя частоты;
- путём регулирования электростанций и преобразователей частоты в параллельном режиме.

Ветроэнергетические установки классифицируются также по двум признакам – по геометрии ветрового колеса и по расположению его относительно направления потока ветра [2].

Быстроходность ветроколеса – это отношение окружной скорости конечной точки лопастей к невозмущённой скорости набегающего потока.

Быстроходность рассчитывается по выражению:

$$Z = \frac{v_R}{u_0}, \quad (1.1)$$

где Z – быстроходность ветроколеса;

v_R – окружная скорость конечной точки лопастей ветроколеса, м/с;

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		13

u_0 - невозмущённая скорость набегающего ветрового потока.

Быстроходность ветроколеса находится в зависимости от количества лопастей: она снижается с увеличением количества лопастей. В зависимости от геометрии ветроколеса ВЭУ подразделяются на тихоходные и быстроходные. Параметр геометрического заполнения ветрового колеса энергоустановки определяется количеством лопастей установки. Тихоходные или многолопастные ветроэнергетические установки с большим значением геометрического заполнения ветрового колеса обладают способностью развивать большую величину мощности при наличии слабого потока ветра и при небольшом количестве оборотов. Быстроходные ветровые энергоустановки с малым значением заполнения ветроколеса способны генерировать максимальную величину мощности при условии достижения ветровым колесом больших величин оборотов.

Важнейшей характеристикой ветроэнергетической установки является коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ). Он также носит название коэффициента мощности. КИЭВ равняется части полной мощности ветрового потока, которая передаётся ветроколесу:

$$C_p = \frac{P_{BK}}{P_{ВП}}, \quad (1.2)$$

где C_p - коэффициент мощности;

P_{BK} - мощность ветрового потока, которую воспринимает ветровое колесо, Вт;

$P_{ВП}$ - полная мощность ветрового потока, Вт.

Согласно критерию Жуковского-Бетца, значение КИЭВ не способно превысить 0,593. В реальных условиях ветроэнергетические установки обладают максимальным значением КИЭВ, которое несколько меньше величины, определённой Жуковским-Бетцем. Помимо этого, КИЭВ подвержен изменению

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		14

при изменении быстроходности ветрового колеса. Зависимость значений коэффициента использования энергии ветра от величины быстроходности ветроколеса изображается на рисунке 1.1.

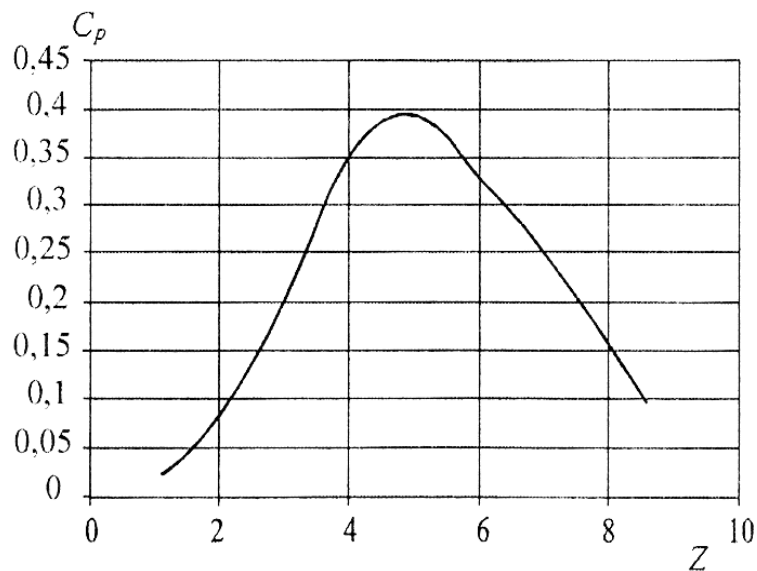


Рисунок 1.1 - Зависимость КИЭВ от быстроходности ВЭУ

Ветроэнергетические установки по положению ветрового колеса относительно направления потока ветра подразделяются на два основных типа: с горизонтальной осью вращения и вертикальной осью вращения ветрового колеса.

У ветроколеса с горизонтальной осью (рисунок 1.2) основной вращающей силой является подъемная сила.

Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата

13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ

Лист

15

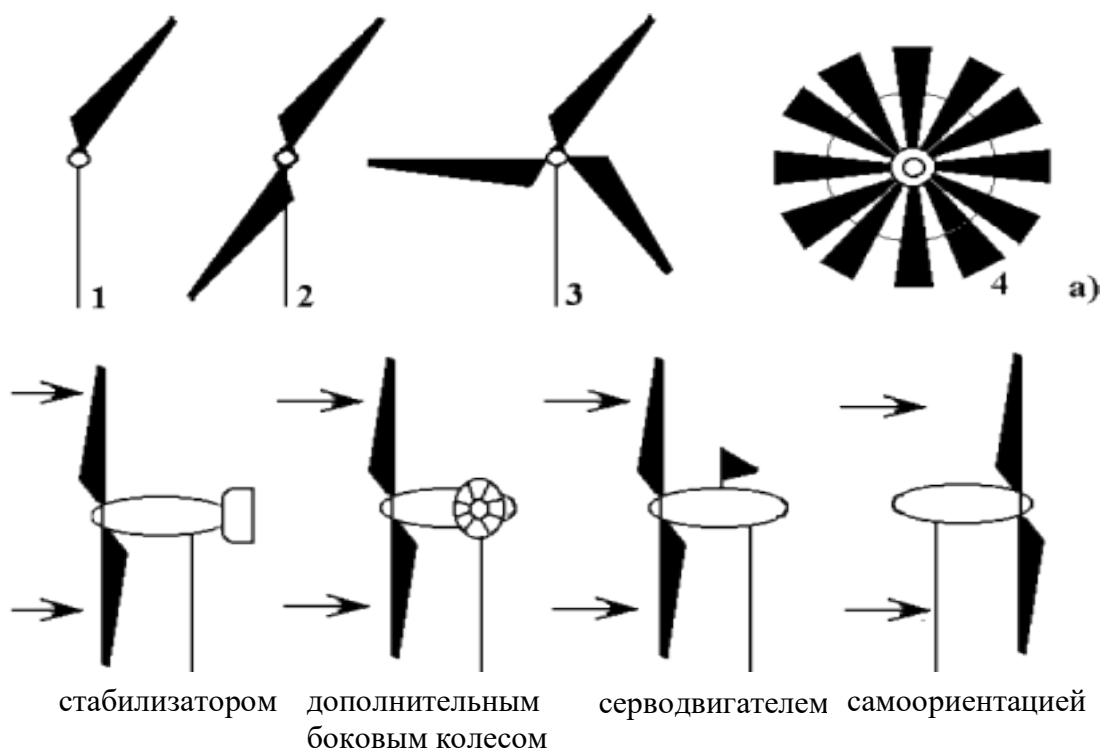


Рисунок 1.2 - Виды ветроколес с горизонтальной осью вращения:

1 - однолопастная; 2 - двухлопастная; 3 - трехлопастная; 4 - многолопастная и виды технических решений по осуществлению ориентации ветроколеса параллельно направлению ветра

В ветроэнергетических установках как правило устанавливаются двух- и трёхлопастные ветроколеса, при этом трёхлопастные обладают наиболее плавным ходом [4].

Ветроэнергетические установки с горизонтальной осью вращения имеют довольно высокий коэффициент использования энергии ветра, который составляет в среднем 0,45. Применение данных ВЭУ крайне эффективно в крупных установках. Ветровые энергоустановки с горизонтальной осью вращения имеют ряд недостатков, в том числе необходимость подстраиваться под направление потоков ветра (рисунок 1.1). Данное требование существенно усложняет конструкцию и увеличивает стоимость ВЭУ. По этой причине применение установок данного типа в малой ветроэнергетике не получило распространения.

Ветровые энергоустановки с вертикальной осью вращения по причине своей геометрии пребывают в рабочем положении независимо от направления ветровых потоков. Помимо этого, данная конструкция позволяет осуществить размещение редуктора с генераторами в нижней части башни только за счёт увеличения длины вала.

Принципиальными недостатками ветровых энергоустановок с вертикальной осью вращения ветроколеса являются:

- подверженность усталостным разрушениям по причине возникающих в них процессов автоколебательного характера;
- возникновение пульсаций крутящего момента, которые приводят к нежелательным колебаниям выходных параметров генераторной установки [4].

Не смотря на недостатки, в ветроэнергетических установках малой мощности применение ветровых колес с вертикальной осью вращения является перспективным вариантом, так как использование современных видов материалов и верно проведённый механический расчёт, осуществление балансировки ветрового колеса может привести к приемлемому минимальному уровню колебания ветроколеса.

Существуют следующие разновидности вертикально-осевых ВЭУ:

- Ротор Савониуса (рисунок 1.3), вращение которого осуществляется силой сопротивления лопастей ветровому потоку. Лопастей данной разновидности ротора производятся из тонких изогнутых листов прямоугольной формы. Данное решение способствует обеспечению простоты конструкции энергоустановки и низкий уровень затрат на изготовление. Возникновение момента вращения происходит по причине разности величин сопротивлений, которые оказываются потоку воздуха вогнутой и выпуклой лопастями ротора. Такая разновидность ветрового колеса обладает большим значением крутящего момента и применяется для транспортировки воды путем перекачивания. Так как вращение лопастей создается силой сопротивления, ротор Савониуса имеет достаточно низкое значение

коэффициентом использования энергии ветра, равное около 0,18. По этой причине установки данного типа не обладают широкой областью применения.

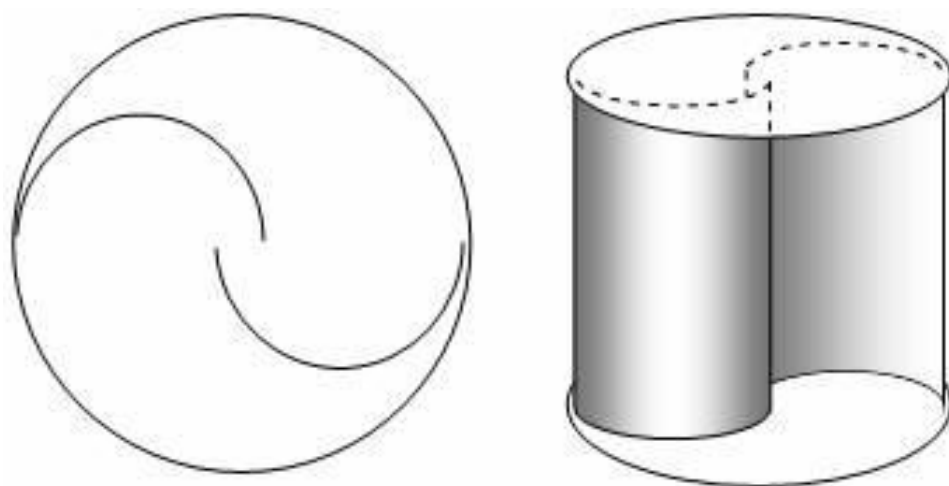


Рисунок 1.3 - Ротор Савониуса

– Ротор Дарье обеспечивает момент вращения путём подъемной силы, которая создаётся на двух или трех несущих изогнутых поверхностях аэродинамического профиля (рисунок 1.4). Максимальная величина вращающего момента возникает, когда лопасть с большим значением скорости пересекает набегающий поток ветра. Ротор данной конструкции не обладает способностью к самостоятельному раскручиванию. По этой причине запуск ротора Дарье производится с использованием специальной электрической машины - генератора, который находится в режиме двигателя.

Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата

13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ

Лист

18

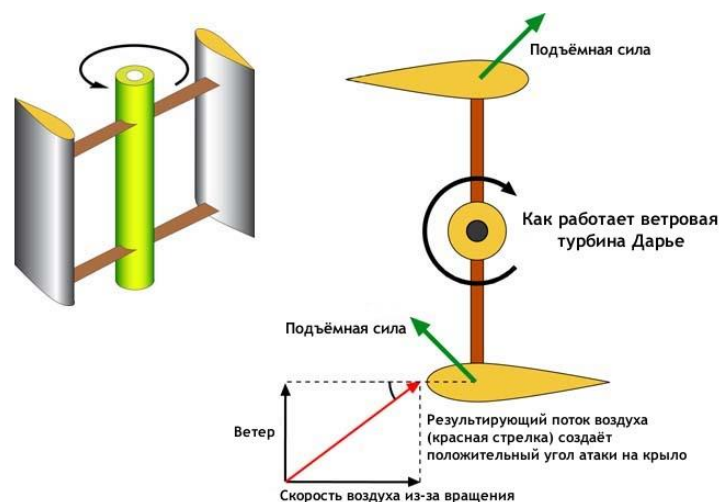


Рисунок 1.4 - Ротор Дарье

– Лопасти ветрового колеса ротора Масгроува в рабочем состоянии расположены в вертикальном положении, однако способны осуществлять вращение или складываться вокруг горизонтальной оси при отключении (рисунок 1.5). Все разновидности данного типа имеют характерный недостаток - подверженность отключению при сильных потоках ветра.

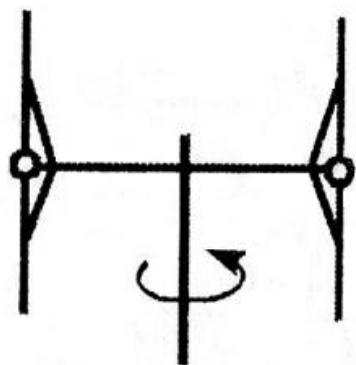
– Ветроколесо ротора Эванса (рисунок 1.6) создаёт момент вращения с помощью создания подъёмной силы, которая достигает максимальной величины, когда лопасть с большим значением скорости пересекает набегающий поток воздуха. Данная разновидность ротора не обладает способностью к самостоятельному раскручиванию до рабочих оборотов. По этой причине для запуска ротора Эванса применяется генератор, который работает в двигательном режиме. Лопасти ротора Эванса при возникновении аварийной ситуации (при высокой скорости потоков ветра) и в процессе управления способны осуществлять поворот вокруг своей вертикальной оси.

Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата

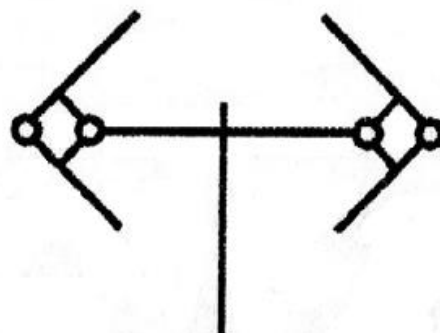
13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ

Лист

19



Рабочее положение



Выключенное положение

Рисунок 1.5 - Ротор Масгроува в рабочем и выключенном положении

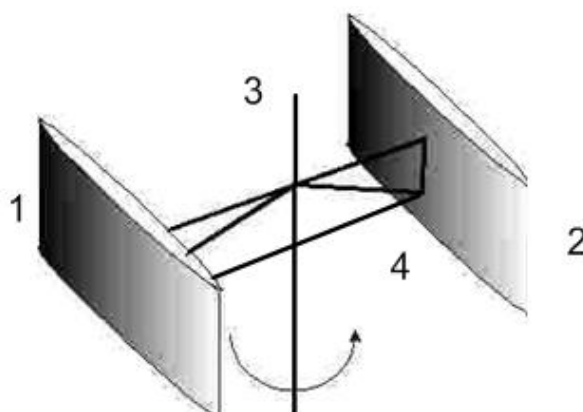


Рисунок 1.6 - Ротор Эванса (1,2 - лопасти, 3 - вертикальный вал, 4 - ось поворота лопастей)

Таким образом, ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения различных типов оптимально применять в установках малой и очень малой мощностей.

Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата

13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ

Лист

20

1.2 Алгоритмы цикла заряда-разряда свинцово-кислотных аккумуляторов

При эксплуатации энергетических комплексов, особенно основанных на возобновляемых источниках, неизбежно возникает необходимость накопления и сохранения электрической энергии. При этом энергетический резерв необходим не только для решения проблемы отсутствия электропитания от возобновляемых источников питания (например, в моменты отсутствия ветра или солнечного излучения), но и как накопительный элемент излишков выработки электрической энергии.

Аккумулятор - это химический источник электрического тока, источник электродвижущей силы многократного действия, основная специфика которого заключается в обратимости внутренних химических процессов в виде окислительно-восстановительных реакций, что обеспечивает возможность его многократного циклического использования (цикл заряда-разряда). Аккумуляторные батареи применяются в качестве накопителей электрической энергии и служат для автономного обеспечения различных устройств и оборудования электрической мощностью. В принципиальном виде химический аккумулятор - это два электрода (катод, имеющий положительный знак и анод, имеющий отрицательный знак), произведенных из различных металлов, которые помещаются в раствор электролита или кислоты. Аккумуляторную батарею, подверженную полному разряду, можно снова зарядить путём проведения электрического тока в направлении, противоположном направлению тока в процессе разряда.

В настоящее время существует несколько типов аккумуляторов электрической энергии. Они различаются применением различных химических веществ-реагентов, а также химическими реакциями, осуществляющимися в аккумуляторе.

Выделяют множество типов аккумуляторов электроэнергии:

- литиево-железно-фосфатные (LiFePO_4);
- литиево-фторные;

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		21

- литиево-ионные (Li-Ion);
- литиево-серные;
- литиево-полимерные (Li-Pol);
- литиево-хлорные;
- литиево-железно-сульфидные;
- железно-никелевые;
- железно-воздушные;
- лантано-фторидные;
- натриево-серные;
- натриево-никелево-хлоридные;
- цинково-воздушные;
- цинково-бромные;
- цинково-хлорные;
- никелево-кадмиевые (NiCd);
- никелево-цинковые (NiZn);
- никелево-металло-гидридные (NiMH);
- свинцово-кислотные (Lead Acid);
- свинцово-водородные;
- серебряно-цинковые;
- серебряно-кадмиевые;
- никель-водородные [5].

Свинцово-кислотные аккумуляторы способны выдавать достаточно большое значение тока кратковременно, что позволяет применять их для осуществления старта двигателей. Именно поэтому такой тип аккумуляторов нашел применение в автотранспорте. Однако, для таких аккумуляторов свойственно обладать небольшим значением энергетической плотности, поэтому они довольно громоздки, что не позволяет применять их в портативной и мобильной технике.

Литий-ионные накопительные элементы обладают высоким показателем энергетической эффективности, однако для них характерна взрывоопасность при перезаряде, и выход из строя при глубоком разряде. При повышении или понижении величины температуры ёмкость литий-ионных аккумуляторных батарей снижается с большей скоростью.

В таблице 1.1 приводятся значения параметров различных типов аккумуляторных батарей.

Таблица 1.1 – Значения параметров различных типов аккумуляторных батарей

Параметры АБ	Lead-acid	Ni-Ca	Ni-Mh	Li-Ion	Li-Po	LiFePO ₄
Количество рабочих циклов до снижения ёмкости на 80%	200-300	1500	300-500	500-1000	300-500	2000-8000
Минимальное время заряда, ч	8-16	1	3-4	2-1	2-4	0,25
Значение тока заряда. С-номинальная ёмкость	0,1-0,2С	0,1 - 3С	0,1-2С	0,1-0,4С	0,1-1С	до 2,8 С
Значение тока заряда. С-номинальная ёмкость	0,1-0,2С	0,1 - 3С	0,1-2С	0,1-0,4С	0,1-1С	до 2,8 С
Саморазряд за месяцы %	5	20	30	10	10	3
Наличие эффекта «памяти»	Нет	Сильный	Слабый	Нет	Нет	Нет
Напряжение элемента в батарее, В	2	1,25	1.25	3.6	3.6	3,3

В современных автономных энергетических системах в качестве накопительных элементов широко применяются стационарные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи [5]. Их распространённое применение обусловлено наличием следующих достоинств:

1) У свинцово-кислотных аккумуляторов имеется широкий диапазон значений ёмкости от единиц ампер-часов до десятков килоампер-часов. Данный диапазон способствует осуществлению комплектаций аккумуляторов с требуемыми параметрами резерва.

2) Свинцово-кислотные накопительные элементы обладают низким значением саморазряда и возможностью сохранения заряда при длительном процессе заряда.

3) Для свинцово-кислотных аккумуляторных батарей свойственно наличие малой величины внутреннего сопротивления, что обеспечивает на высоком уровне стабильность напряжения питания.

Помимо этого, свинцово-кислотные аккумуляторные батареи обладают следующим перечнем недостатков, которые влияют на распространённость их применения:

1) Свинцово-кислотные накопители обладают большими значениями массогабаритных параметров. Это связано с наличием низкой удельной плотности запасаемой электрической энергии.

2) Во время функционирования свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, в них происходит процесс образования газов. Поэтому с целью обеспечения защиты от взрыва накопительного блока требуется организация естественной или принудительной вентиляции воздуха в аккумуляторных установках. По причине взрывоопасности аккумуляторные батареи строго запрещается помещать в герметичных шкафах, отсеках и т.д. [6]

Для бесперебойного функционирования свинцово-кислотных аккумуляторов требуется определенный алгоритм их заряда. В случае несоблюдения требуемого алгоритма заряда возникает высокая вероятность закипания электролитического раствора. Такая ситуация происходит в случае превышения максимального значения тока, что обуславливает повышенную пожарную опасность, а также приводит к снижению ёмкости аккумулятора и ресурса его работы в целом. Для свинцово-кислотных накопительных установок не является критичным процесс заряда токами малых значений. Это также является их положительным качеством

при их применении в автономных энергосистемах, основанных на возобновляемых источниках энергии.

Самым простым и безопасным методом зарядки свинцового аккумулятора является метод «I-U» (ток - напряжение). Он заключается в заряде аккумулятора в два этапа.

Первый этап данного метода подразумевает заряд постоянным током, а после достижения требуемого напряжения следует поддерживать уровень постоянного напряжения. Для многих моделей стационарных свинцовых аккумуляторных батарей максимальное начальное значение тока заряда не должно быть больше величины $0,3C$, а наиболее оптимальным является ток, равный $0,1C$. Заряд аккумулятора таким значением тока не приведёт к каким-либо негативным последствиям (снижение ресурса работы, ёмкости и т.д.).

Второй этап алгоритма заключается в поддержании постоянного уровня напряжения на клеммах аккумуляторной батареи. Максимальная величина напряжения на накопителе не должно превышать $2,3 \pm 0,023$ В на каждый аккумуляторный элемент. То есть для свинцово-кислотного аккумуляторного устройства с номинальным напряжением, равным 12 В, конечное напряжение заряда не должно превышать $13,8 \pm 0,15$ В. Метод I-U обычно используется при функционировании аккумуляторных батарей в буферном режиме, так как под напряжением $13,8 \pm 0,15$ В современные герметичные свинцово-кислотные накопительные установки способны пребывать на протяжении всего своего ресурсного срока эксплуатации.

При соблюдении требований алгоритма работы и значения тока заряда 10% от ёмкости аккумуляторной батареи за период времени 8-9 часов свинцово-кислотный накопитель энергии заряжается примерно до 90% своей номинальной ёмкости. После перехода к режиму постоянного напряжения, значение тока заряда аккумулятора стремительно падает, и полный заряд аккумулятора осуществляется в течение суток. Имеется также форсированный способ заряда аккумуляторной батареи - заряд постоянным электрическим током до напряжения 14,5 В, а после

отключение зарядного устройства, либо перевод его в режим поддержания напряжения $13,8 \pm 0,15$ В. Данный способ заряда следует осуществлять единожды в случае экстренной ситуации. Он осуществляет процесс заряда аккумуляторной батареи за 6 часов при начальном значении тока, равного 20% от ёмкости. Всё же в качестве основного данный метод заряда является неприемлемым, так как он способствует снижению ёмкости аккумуляторной батареи [7].

Метод осуществления заряда I-U является достаточно простым в реализации, но при этом достаточно эффективным способом заряда аккумуляторных батарей. Он также обладает высоким уровнем надёжности работы.

Перспективой развития накопителей электроэнергии в настоящее время становятся литий-железо-фосфатные аккумуляторные устройства. Они обладают широким рядом преимуществ по сравнению с свинцово-кислотными аккумуляторными батареями:

- отсутствие эффекта потери ёмкости при чрезмерном охлаждении;
- пониженная пожарная опасность;
- способность вырабатывать большие токи разряда (до 50С);
- способность осуществления заряда сильным током за короткое время (быстрый заряд);
- наличие большого количества циклов осуществления заряда-разряда (2000-8000 до потери 20% ёмкости);
- весьма малая подверженность потере ёмкости при хранении.

К недостаткам литий-железо-фосфатных аккумуляторных устройств относятся следующие характерные особенности:

- большая величина стоимости при меньшем значении ёмкости батареи;
- наличие меньшей энергоемкости;
- отсутствие совместимости с устройствами, использующими литий-ионные элементы, по причине различий в требуемом диапазоне напряжений, который составляет 2-3,65 В;

– необходимость строгого соблюдения диапазона напряжений - 2-3.65V [8].

Для литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей необходима разработка и реализация сложного алгоритма процесса заряда, что также является их недостатком. Однако, в настоящее время определены алгоритмы капельного и быстрого заряда, которые отслеживают значение температуры аккумуляторной батареи и не допускают появления перегрева [9].

1.3 Алгоритм капельного заряда литий-ионных батарей

Капельная зарядка, предлагаемая для исследования литий-ионных аккумуляторных батарей после процесса полного заряда (95-99% от начальной ёмкости), как правило негативно влияет на состояние батарей. Данное явление вызвано неспособностью такой разновидности аккумуляторных батарей поглощать электрическую энергию при возникновении перезаряда, что приводит к процессу их разрушения. При этом, отсутствие применения капельной зарядки постепенно приводит к старению, то есть деградации, накопительных элементов по причине частично незавершенного заряда и способствует снижению эффективности применения аккумуляторных батарей. По этой причине требуется оптимальный вариант, который поможет реализовать внесение в алгоритм процесса заряда обратной связи по температуре. Данное решение позволит избежать возникновения перегрева и в необходимый момент времени перейти к капельной зарядке, в процессе которой будет осуществляться контроль состояния аккумуляторов, тем самым увеличивая срок службы накопителей энергии. Стоит отметить, что не все производители аккумуляторных батарей в эксплуатационной технической документации к продукту указывают сведения о капельной зарядке. Данный факт способствует возникновению трудностей в целесообразности применения капельной зарядки при осуществлении разработки систем накопления электрической энергии.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		27

Деградация составных элементов литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей вызвана особенностями структуры материала электродов. Данный материал составлен из множества частиц, размер которых находится в пределах микрометра. Протекание процессов заряда и разряда для каждой частицы материала электродов является строго индивидуальным и осуществляется последовательно от одной частицы к другой. Такая разновидность модели протекания процессов заряда-разряда носит название «многоэлементной модели» [23].

В процессе заряда осуществляется отсоединения ионов лития. При данном освобождении частица с полным зарядом представляет собой фосфатный ион FePO_4 . Во время протекания разряда, выполняется возвращение ионов лития. В результате чего, фосфатный ион преобразуется в литий-ионный фосфат LiFePO_4 . Разница в количестве ионов лития, повторно вступающих в связь с фосфатными ионами, носит название дифференциального коэффициента деградации аккумуляторной батареи. Дифференциальный коэффициент деградации представляет собой нелинейную характеристику старения, известную как зависимость уровня состояния заряда (УСЗ или «state of charge, SOC») при выполнении заряда разными значениями зарядных токов в диапазоне от 0,1С до 10С. Вследствие этого, разница в количестве ионов способствует появлению некоторых критических результатов, которые приводят к уменьшению химического потенциала [23].

В разрабатываемом алгоритме капельный заряд выступает в качестве опционально-вспомогательного решения. Огромное значение требуется придавать тренировочному процессу начальной капельной зарядки. Данная тренировка представляет собой серию импульсных циклов процесса заряда-разряда с целью обнаружения и выявления уровня состояния заряда и соответствующего ему значения зарядного тока. Процесс капельной зарядки на заключительной стадии обладает доминирующей позицией в плане предотвращения преждевременной деградации аккумуляторных батарей [24].

Разрабатываемый алгоритм обладает существенным недостатком – он не предусматривает возможность контроля температуры, который необходим для всех существующих типов батарей. При этом каждый тип требует определения индивидуальных граничных условий осуществления температурного контроля. В качестве объекта исследования были выбраны литий-железо-фосфатные LiFePO_4 батареи, так как данный вид аккумуляторов обладает повышенным уровнем взрывобезопасности, а также имеет высокую величину электрохимического потенциала.

Добавление к разрабатываемому алгоритму системы обратной связи по температуре с учетом начальной тренировочной и конечной завершающей капельной зарядки в итоге сформирует следующий вид структурной схемы заряда для аккумуляторных батарей [24]:

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		29

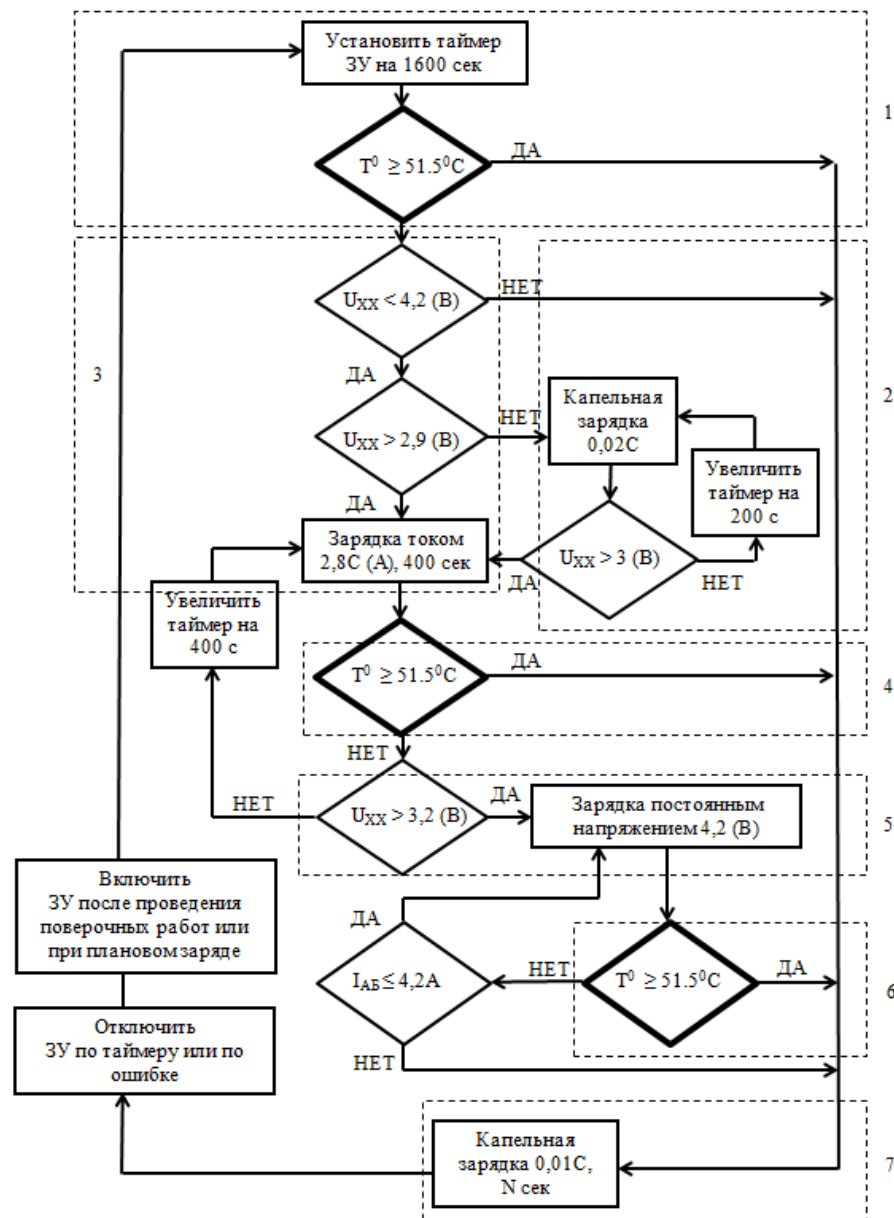


Рисунок 1.7 - Алгоритм заряда LiFePO4 батареи с капельной зарядкой и обратными связями по температуре

На рисунке 1 U_{xx} – значение напряжения холостого хода аккумуляторной батареи, I_{AB} – значение тока заряда батареи, ЗУ - зарядное устройство, T^0 – величина температуры батареи, С - ёмкость батареи. Толстым начертанием линии выделены элементы температурного тестирования.

Стадии работы разрабатываемого результирующего алгоритма заряда-разряда аккумуляторной батареи содержат следующий перечень алгоритмов:

- 1 - алгоритм первоначального температурного тестирования;

- 2 - алгоритм начальной (тестовой и/или тренировочной) капельной зарядки;
- 3 - алгоритм основной зарядки током;
- 4 - алгоритм перманентного температурного тестирования;
- 5 - алгоритм основной зарядки напряжением;
- 6 - алгоритм перманентного температурного тестирования;
- 7 - алгоритм конечной капельной зарядки.

При возникновении необходимости в применении алгоритма в иных типах аккумуляторных накопителей, требуется принимать в расчёт иные характеристики заряда в соответствии с номинальными параметрами. При условии соблюдения данных особенностей алгоритм капельного заряда является универсальным в применении и не способствует ускорению процесса деградации аккумуляторов. По этой причине разрабатываемый алгоритм имеет особую важность для повышения уровня качества и эффективности заряда современных моделей литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей. Также он обладает совместимостью к любому типу литий-ионных накопительных элементов при условии осуществления необходимого соответствующего расчёта параметров заряда-разряда аккумуляторной батареи.

1.4 Методы осуществления поиска точки максимальной мощности

Ранее отмечалось, что небольшие автономные энергосистемы, основанные на возобновляемых источниках энергии, как правило, размещаются в непосредственной близости от потребителей электрической энергии. Данная необходимость объясняется нерациональностью передачи электроэнергии малых мощностей на большие расстояния. Помимо этого, близость к потребителю имеет

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
						31
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		

особенную важность в малонаселённых и отдалённых районах, т.к. в данном случае обеспечивается простота эксплуатации.

Однако подобное размещение не всегда является выгодным решением с энергетической точки зрения. Более того, места расположения малых ветроэнергетических установок могут размещаться на пути ветровых потоков, обладающих малой плотностью и небольшой удельной энергией. Исходя из этого, одной из основных задач системы управления ветроэнергетической установкой является осуществление отбора максимальной мощности.

Термин максимальная мощность описывается с помощью параметра, называемого точкой максимальной мощности (ТММ). Разработаны несколько методов отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ, или МРРТ в англоязычной литературе - maximum power point tracking). Данные способы подразделяются на две категории, одна из которых применяет датчики в процессе своей работы, исключая датчики тока и напряжения, другая не использует их [10].

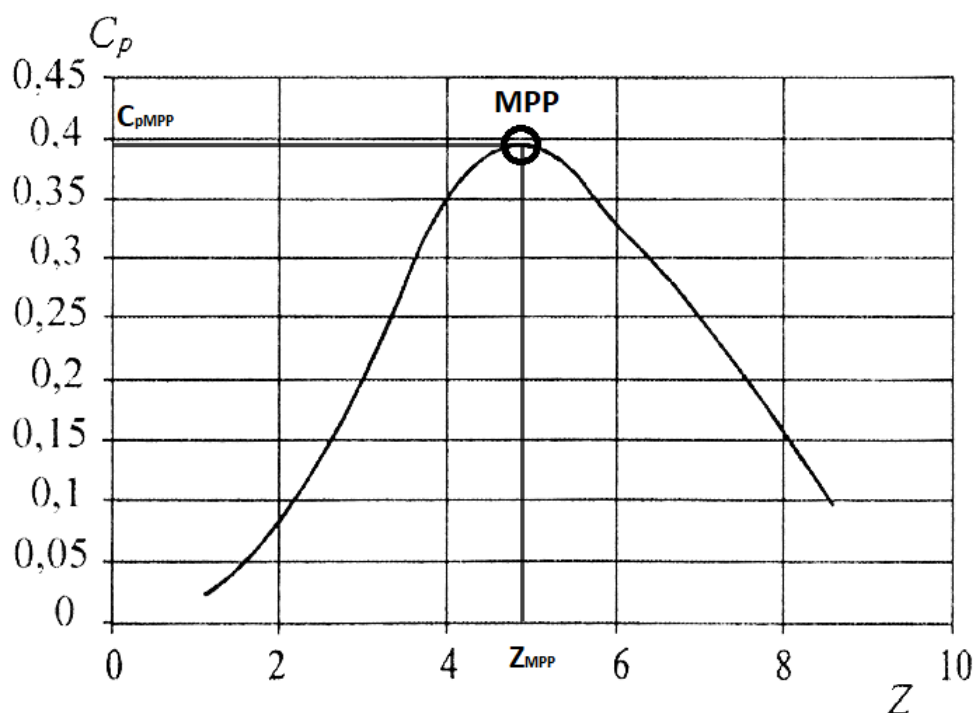


Рисунок 1.8 – Изображение точки максимальной мощности (ТММ) на графике

Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата

13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ

Лист

32

К категории способов, применяющих датчики в процессе своей работы, относится метод по отслеживанию максимальной быстроходности (англ. TSR - tip speed ratio). Коэффициент использования энергии ветра C_p является функционально связанным с коэффициентом быстроходности Z . Используя отслеживание быстроходности метод выполняет регулирование скорости вращения турбины или её момент напрямую. Данное решение требуется для поддержания значения быстроходности на определённом оптимальном уровне, при этом производя измерения текущих значений скорости ветра и вращения турбины.

Другой разновидностью методов отслеживания точки максимальной мощности являются способы, которые в процессе не применяют датчики. Одним из таких способов отслеживания является метод «возмущение и наблюдение» (англ. P&O - perturbation & observation). В основе функционирования данного метода лежит принцип, заключающийся в небольшом изменении величины входного относительно генератора ветровой энергоустановки сопротивления с целью определения при этом изменений электрической мощности, вырабатываемой ветроэнергетической установкой. При наличии положительных изменений, энергоустановка продолжает осуществлять изменение своего сопротивления в том же направлении, до тех пор, пока не прекратится увеличение мощности. Если изменение отрицательно, то осуществляется изменение сопротивления в противоположном направлении.

Такой способ имеет широкое распространение, так как обладает простой реализацией. Метод возмущения способен достигать высокого уровня эффективности при верно подобранном алгоритме изменения величин сопротивления и расчета прогноза изменений мощности [11].

Альтернативным методом является дифференциально-индуктивный метод (метод возрастающей проводимости, англ. incremental conductance) с проведением вычисления точки, в которой производная мощности по напряжению равняется нулю, что по определению производной является максимальной точки, а затем определением соответствующего значения напряжения. Данный метод требует

несколько большей вычислительной мощности системы управления и контроля (контроллера). При таком подходе определения осцилляция не влияет на уровень эффективности, однако имеется вероятность попадания в локальный максимум функции мощности.

Вероятным вариантом может служить подход объединения, при котором вначале применяется дифференциально-индуктивный способ, а в дальнейшем реализуется «возмущающий» метод с целью исключения вероятности появления локального максимума функции мощности. В данном случае достигается наибольшая эффективность, однако от системы управления требуется высокая производительность.

Метод возмущения и наблюдения, а также дифференциально-индуктивный способ входят в состав класса методов «восхождения». Данная группа методов способна вычислять локальный максимум функции мощности, что позволяет определить истинную точку максимальной мощности.

Дифференциально-индуктивный способ обладает рядом преимуществ перед методом возмущения и наблюдения. Он способен осуществить определение точки максимальной мощности без возникновения возмущений мощности. При этом данный способ не теряет способность в быстро изменяющихся внешних условиях производить отслеживание максимальной мощности с большой точностью. Однако при работе дифференциально-индуктивного метода в быстро изменяющихся условиях имеется вероятность возникновения колебаний мощности. Помимо этого, данный метод обладает более сложным в реализации алгоритмом, вследствие чего увеличиваются затраты ресурсов на его вычисление.

Несмотря на недостатки, в ветроэнергетических установках малой мощности использование методов отслеживания без применения датчиков является рациональным, так как пропадает необходимость в дополнительных затратах на датчики и отсутствует усложнение энергоустановки в целом. Помимо этого, данные методы способны обеспечить достаточно высокий уровень эффективности и точности определения.

1.5 Методы, применяемые для торможения ветроколеса

На данный момент разработано несколько разновидностей методов снижения скорости ветрового колеса:

- электромеханические способы;
- аэродинамические методы;
- электрические способы.

Аэродинамические методы достигают снижения скорости вращения турбины за счёт изменения параметров аэродинамических характеристик ветрового колеса. Геометрические характеристики ветрового колеса могут быть изменены применением приводов, которые способны регулировать угол атаки лопастей, или же механическими устройствами (подшипниками, пружинами и т.д.), которые осуществляют складывание лопастей. При этом результирующий коэффициент использования ветра меняет своё значение, и скорость вращения ветрового колеса таким образом регулируется. Такие способы обладают следующим недостатком: усложнение конструкции устройства в целом, и, как следствие этого, пониженный уровень надёжности. Помимо этого, ветровые колёса, управляющиеся с помощью механических устройств, обладают узким диапазоном регулирования.

Электромеханические способы торможения ветрового колеса ВЭУ выполняют остановку путём процесса фиксации ротора электрического генератора электромагнитным устройством (ЭУ) в случае превышения значения скорости вращения лопастей ветрового колеса допустимой величины. Недостатком данного способа является эффективность применения лишь при низком пороговом значении скорости потоков ветра вследствие больших ударных воздействий на элементы электромагнитного устройства.

Электрические методы торможения являются более эффективными и надёжными способами регулирования скорости вращения ветрового колеса ветроэнергетической установки. Одной из разновидностей электрических методов

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		35

торможения ветроколеса является использование балластных резисторов, применение которых способно обеспечить увеличение величины момента противодействия генератора аэродинамическому моменту. Данный метод выделяется простотой в использовании, но обладает низким уровнем эффективности при возникновении ураганных ветровых потоков. Помимо этого, балластные резисторы осуществляют ступенчатое регулирование характеристик, что способствует появлению дополнительных трудностей.

Следующим электрическим методом осуществления останова ветровой энергоустановки является выполнение короткого замыкания фаз трехфазного генератора. В данном случае напряжение, вырабатываемое ветроэнергетическим генератором, становится замкнутым на внутреннее сопротивление ротора генератора, которое обладает малым значением, в следствие чего в обмотках генератора возникает электрический ток большой величины. При этом, явление самоиндукции создаёт препятствие любым появляющимся изменениям тока, создавая встречный момент, который осуществляет процесс торможения вращающегося вала генератора ВЭУ [12].

1.6 Методы управления мощностью ветровых энергоустановок

На современном этапе развития науки и техники электроэнергетические системы, построенные на базе возобновляемых источников энергии, содержат в своём составе большое количество взаимосвязанных подсистем [13; 14; 15]. С целью проведения исследований данных энергосистем необходимо применение мощных средств математического аппарата, использующего в процессе своего функционирования ресурсы вычислительных устройств и его реализации в виде соответствующего программного обеспечения [16].

На сегодняшний день разработано множество специализированных программных средств, направленных на проведение математических расчетов, например, MathCad [17; 18; 19]. Данные программные комплексы осуществляют

быструю реализацию математических моделей различного характера и направленности, используя приёмы программирования модельно-ориентированной направленности.

Исходя из конструкции ветровых энергоустановок можно выделить следующие разновидности [20]:

- с горизонтальной осью вращения;
- с вертикальной осью вращения.

Ветроэнергетические установки с горизонтальной осью вращения подразделяются на следующие типы[21]:

- с постоянным установочным углом лопастей;
- с изменяемым установочным углом лопастей.

Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения подразделяются на [21]:

- с постоянной геометрией ветроколеса;
- с изменяемой геометрией ветроколеса [22].

Основными методами управления мощностью ВЭУ являются:

– осуществление работы при постоянной частоте вращения ветрового колеса [23];

– работа при наличии нескольких фиксированных частот вращения ветрового колеса путём переключения фаз обмоток генератора [24];

– функционирование, осуществляющееся при нескольких фиксированных частотах вращения ветрового колеса путём переключения передаточного отношения мультипликатора [25];

– осуществление работы при переменной частоте вращения с возможностью изменения установочного угла лопастей ветрового колеса или изменением геометрических параметров ветрового колеса [26];

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		37

– работа при переменной частоте вращения с применением электрического преобразователя с регулятором мощности [27].

На рисунке 1.7 изображена зависимость аэродинамической мощности ветрового колеса от частоты вращения, свойственные разным скоростям потоков ветра. На графике видно, что для каждой конкретной скорости потока существует определенная частота вращения, при которой мощность ветрового колеса является максимальной.



Рисунок 1.9 — Зависимость генерируемой мощности от частоты вращения ветроколеса для разных скоростей ветрового потока

1.6.1 Способ управления мощностью при постоянной частоте вращения

Способ управления мощностью при постоянной частоте вращения является наиболее простым в плане реализации [28]. Примером использования такого метода может выступать конструкция ветровой энергоустановки, в которой ротор ветрового колеса напрямую или через мультипликатор соединяется с ротором синхронного генератора, поддерживающего возбуждение от постоянных магнитов [29]. Обмотки генератора подключаются ко входу диодного выпрямительного моста, выход которого подключается к аккумуляторной батарее [30].

В процессе работы такой ветроэнергетической установки при возникающих изменениях скорости потоков ветра изменяется величина напряжения на выходе

генератора, и на выпрямителе соответственно [30]. Вследствие этого, при низких значениях скорости ветра величина выходного напряжения становится ниже напряжения аккумулятора. В итоге, электрический ток в аккумуляторной батарее прекращает протекать, что является причиной снижения величины электромагнитного момента генератора на валу ветрового колеса. При возрастании величины скорости ветрового потока частота вращения генератора начинает стремиться к увеличению, что обеспечивает рост значения выходного напряжения генератора и электрического тока в накопительном устройстве. Увеличение значения тока приводит к росту величины электромагнитного момента генератора на валу ветрового колеса, что не позволяет ему достигать частоты вращения выше определенного предельного значения, чем и осуществляется процесс стабилизации [23].

Данный способ обладает следующими преимуществами:

- отсутствует необходимость в таких устройствах, как коробка передач или механизм изменения установочного угла лопастей, что способствует упрощению конструкции ветрового колеса и позволяет повысить уровень его надёжности [23];
- обеспечивается возможность использования генератора с возбуждением от постоянных магнитов, что приводит к повышению коэффициента полезного действия всей ветровой энергоустановки в целом, так как данный вид генераторов не нуждается в потреблении электроэнергии на возбуждение магнитного поля;
- наличие возможности использования простой схемы процесса преобразования переменного электрического тока генератора в постоянный ток заряда накопительного устройства. Применение диодного выпрямительного моста позволяет упростить конструкцию ВЭУ и уменьшить за счёт этого стоимость реализации проекта.

Метод управления мощностью при постоянной частоте вращения обладает следующими недостатками:

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		39

– наличие узкого диапазона скоростей потоков ветра, в котором обеспечивается высокий уровень эффективности работы ветровой энергоустановки;

– необходимость использовать специализированные меры для осуществления защиты от превышения величины мощности при скоростях ветрового потока, превышающих номинальное значение.

1.6.2 Управление мощностью ступенчатым изменением частоты вращения ветроколеса путём переключения обмоток генератора

Более сложным в плане реализации является метод управления мощностью ступенчатым изменением частоты вращения ротора путём переключения обмоток генератора [30]. Данный способ подобен методу управления мощностью при постоянной частоте вращения ветрового колеса. Его отличие заключается в том, что в зависимости от величины скорости потоков ветра конструкция ветровой энергоустановки осуществляет изменение выходного напряжения генератора. Такая особенность способствует обеспечению работы ветрового колеса с частотой вращения, которая изменяется в зависимости от значения скорости потоков ветра, что позволяет осуществлять эффективное функционирование при нескольких величинах скоростей ветрового потока.

Данный способ обладает следующими преимуществами:

– возможность существенного расширения диапазона значений скоростей ветрового потока, которые позволяют осуществлять эффективную работу ветроэнергетической установки;

– сохранение простоты электрического преобразователя ВЭУ путём делегирования функции исполнительного устройства системы управления

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		40

ветровой энергоустановкой на электромеханический коммутатор обмоток генератора.

Однако данному методы характерны следующие недостатки:

– для осуществления данного способа в системе управления ВЭУ необходимо производить измерение скорости потоков ветра с применением анемометра или определять эту величину по косвенным признакам, например, по величине углового ускорения скорости потока ветра;

– использование устройства коммутации обмоток генератора способствует снижению уровня надежности электрического оборудования ветровой энергоустановки;

– имеется необходимость использования специализированных защитных средств с целью ограничения величины мощности генератора при скоростях потоков ветра, превышающих номинальное значение.

1.6.3 Управление мощностью ВЭУ методом изменения передаточного отношения редуктора-мультипликатора ветродвигателя

Еще одним из методов регулирования частоты вращения ротора ветрового колеса под изменяющуюся скорость потоков ветра является использование механической передачи между валом ветроколеса и валом электрического генератора с переменным или ступенчато изменяемым передаточным отношением [28]. Примером данного вида устройств является редуктор/мультипликатор с наличием нескольких передач или клиноременный вариатор [30].

Данный метод аналогично управлению мощностью ступенчатым изменением частоты вращения ветроколеса путём переключения обмоток генератора позволяет осуществить расширение диапазона величин скоростей ветрового потока. При этом требуется применять достаточно простые по конструктивному исполнению синхронные генераторы, которые рассчитанные на функционирование с фиксированной частотой вращения.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		41

Данный метод имеет следующие достоинства:

– использование механической передачи с переменным передаточным отношением позволяет осуществить расширение диапазона величин скоростей потоков ветра, способствующих эффективной работе ветроэнергетической энергоустановки;

– простота применяемого электрического преобразователя ВЭУ путём делегирования функций исполнительного устройства системы управления ветровой энергоустановки регулируемой коробке передач.

Так же данному способу присущи следующие недостатки:

– необходимо применение анемометра или другого устройства, позволяющего определить значение текущей скорости потока ветра;

– использование устройства перемены передач способствует снижению уровня надежности механической передачи от ветрового колеса к генератору ВЭУ;

– использование устройства перемены передач приводит к повышению величины механических потерь в связке «ветровое колесо - генератор» и снижению уровня общей эффективности ВЭУ;

– наличие необходимости использования специализированных защитных средств с целью ограничения величины мощности электрического генератора при скоростях потоков ветра, превышающих номинальное значение.

1.6.4 Управление мощностью ВЭУ путём изменения установочного угла лопастей или геометрических размеров ветроколеса

Методом, осуществляющим адаптацию характеристик ветроколеса к изменяющимся условиям ветрового потока, является управление мощностью ветровой энергоустановки путём изменения установочного угла лопастей [27] или геометрических размеров ветрового колеса [31]. Для осуществления данного способа требуется использование такой конструкции ветроколеса, способной выполнять автоматическое изменение аэродинамических поверхностей, которое

вызывает изменение аэродинамических характеристик ветрового колеса в соответствии с величиной скорости потоков ветра [22]. Такая конструкция нуждается в оснащении ветрового колеса специальными агрегатами, которые способны к осуществлению функции управления [24].

Данный метод обладает следующими достоинствами:

- механизированная конструкция ветрового колеса способствует наиболее полной реализации энергии ветровых потоков в широком диапазоне величин рабочих скоростей;

- обеспечивается аэродинамическое регулирование мощности ветровой энергоустановки, при этом осуществляется наиболее благоприятные режимы функционирования.

Ключевыми недостатками метода являются:

- требуется применение сложной системы управления механическими устройствами и агрегатами с целью изменения геометрических характеристик аэродинамических поверхностей ветрового колеса;

- использование механических устройствами или агрегатов с целью изменения геометрии аэродинамических поверхностей ветрового колеса вызывает снижение уровня надежности конструкции ВЭУ и способствует к возникновению необходимости осуществления технического обслуживания в процессе работы ветроэнергетической установки;

1.6.5 Функционирование ветроэнергетической установки при переменной частоте вращения ветроколеса

В многочисленных исследованиях было определено, что наибольший уровень эффективности функционирования ветрового колеса достигается при осуществлении изменения частоты вращения ротора ветрового колеса согласно определенной закономерности [21]. Данная закономерность характеризуется с помощью термина «быстроходность», который равняется отношения линейной

скорости конца лопасти к скорости потока ветра. Каждому конструктивному исполнению ветрового колеса с определёнными геометрическими характеристиками соответствует определенная величина быстроходности, при которой осуществляется наибольший уровень эффективности работы. Осуществление эффективного функционирования ветроэнергетической установки требует постоянного поддержания определённого значения быстроходности на необходимом уровне, изменяя значение частоты вращения ротора ветрового колеса в зависимости от изменяющейся величины скорости ветра [32].

Для осуществления корректной работы ВЭУ необходимо использование преобразователя электроэнергии [28]. Данный преобразователь обеспечивает преобразование переменного тока генератора в постоянный электрический ток заданной величины для осуществления режима функционирования ветроэнергетической установки, при котором величина мощности нагрузки генератора обеспечивала необходимую частоту вращения ветрового колеса при заданном значении скорости ветра.

Метод обладает следующим перечнем преимуществ:

- использование электрического регулирования скорости вращения ветрового колеса делает возможным обеспечение эффективного функционирования ВЭУ в широком диапазоне значений скорости ветрового потока;
- сохраняется простота конструкции ВЭУ с помощью делегирования функций исполнительного устройства системы управления ветроэнергетической установки электрическому преобразователю;
- использование управляемого электрического преобразователя осуществляет защиту электрического генератора от появления перегрузок в условиях чрезмерно высоких значений скорости потоков ветра, например, при возникновении буревых ветров или штормов.

Также данный метод обладает следующими недостатками:

- необходимо использование анемометра или другого устройства определения величины текущей скорости ветрового потока;

– сложное конструктивное исполнение способствует появлению больших необходимых затрат на реализацию энергосистемы с ВЭУ.

Выводы по разделу 1

В разделе 1 были рассмотрены теоретические основы функционирования ветровых энергоустановок, в том числе различные типы ветровых колес, разновидности вертикально-осевых ветровых колёс, характерные особенности свинцово-кислотных аккумуляторных батарей и их требования к значениям тока заряда, а также различные методы управления ветроэнергетическими установками, отслеживание точки максимума мощности и алгоритмы осуществления торможения ветрового колеса.

Вертикально-осевые ветровые энергоустановки находят широкое применение в системах малой и очень малой мощностей. Они являются удобными в использовании вследствие наличия у данного типа ВЭУ индифферентности к направлению ветровых потоков.

В автономных энергетических системах малой и очень малой мощности широкое применение сыскали свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Оптимальным алгоритмом их заряда является метод «I-U», который заключается в заряде в начале постоянным током, а затем постоянным напряжением.

Существует множество методов осуществления управления ветроэнергетическими установками, в том числе с применением датчиков определения скорости ветра и момента ветрового колеса, а также без использования датчиков. Применение методов с использованием датчиков способствует удорожанию и усложнению энергетической установки, по этой причине их использование рационально в системах большой мощности. Методы без применения датчиков используются в малых системах и имеют высокий уровень эффективности

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		45

2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В ПРОГРАММНОМ ВИДЕ

2.1 Формирование структурной схемы энергосистемы

В энергетических системах, основанных на применении возобновляемых источников энергии, требуется осуществлять согласование уровней и различных типов напряжений между собой. Данное требование является актуальным для энергетических установок, для которых характерны переменные частоты вращения, а изменению подвергаются величины амплитуды и частоты переменного напряжения. Данные типы установок обладают большим уровнем эффективности, в отличие от энергетических установок, которые функционируют при постоянной частоте вращения и с другими алгоритмами работы. Для этой цели используются различные технические устройства, которые для наглядности представляются в виде структурной схемы. Данная схема позволяет осуществить наглядное представление взаимосвязей устройств между собой, их согласование, подбор необходимых устройств, а также произвести оценку и выяснить, какие именно устройства должны контролироваться системой управления энергосистемы.

В роли генераторов ветроэнергетических установок часто применяются асинхронные, либо синхронные электрические машины. Они обладают определенным преимуществом по сравнению с генераторами постоянного тока, которое заключается в отсутствии токоснимающих щёток. Данные щётки в большой степени подвержены разрушению при длительном сроке работы. Синхронные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов нашли широкое применение в ветровых энергоустановках малой и очень малой мощности. Отсутствием применения магнитомягких материалов и особенностями

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		46

в конструкции синхронных генераторов удалось достичь высокого уровня коэффициента полезного действия. Дополнительным преимуществом также является снижение реактивного момента генератора, что способствует снижению пульсаций реактивного момента, и, как следствие, уменьшению уровня вибраций и шума.

В автономных системах с применением возобновляемых источников энергии требуется применение накопителей энергии. Такое решение позволяет отдавать электрическую энергию потребителям даже в случае отсутствия выработки возобновляемыми источниками. При этом в момент пиков генерации электрической мощности энергия сохраняется в накопительных устройствах. Широкое распространение в качестве накопителей электроэнергии нашли химические аккумуляторы, виды и принцип работы которых подробно рассмотрены в пункте 1.2.

В процессе работы генератора ветроэнергетической установки возникает проблема в осуществлении согласования переменного трёхфазного напряжения, подверженного изменению амплитуды и частоты при изменении скорости потоков ветра, с требуемым значением напряжения аккумуляторных батарей. По этой причине в ветроэнергетических установках малой и очень малой мощности наиболее часто применяется метод преобразования переменного напряжения обмоток трёхфазного генератора сперва в постоянный электрический ток с целью осуществления заряда аккумуляторных батарей, а затем - снова в переменный, который стабилизируется по амплитуде (чаще всего значение составляет - 220 В) и частоте (50 Гц). В качестве выпрямительных устройств могут использоваться как управляемые (выполненные на тиристорных, либо на транзисторных элементах), так и неуправляемые выпрямители (выполненные на диодах). Наиболее применяемым вариантом выпрямительных устройств является мост Ларионова, который выполняется как на диодных (рисунок 2.1), так и на тиристорных элементах (рисунок 2.2).

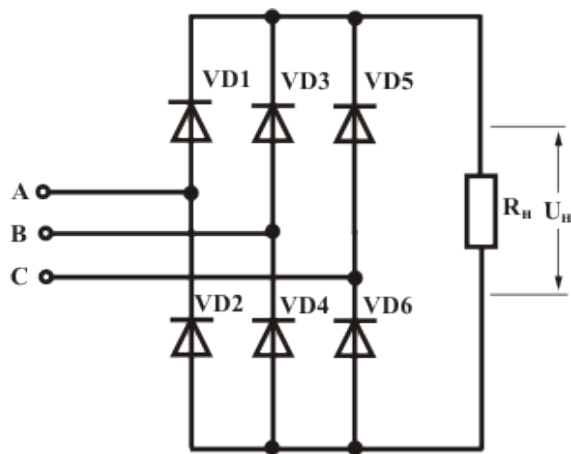


Рисунок 2.1 - Трёхфазное выпрямительное устройство (мост Ларионова) на диодах

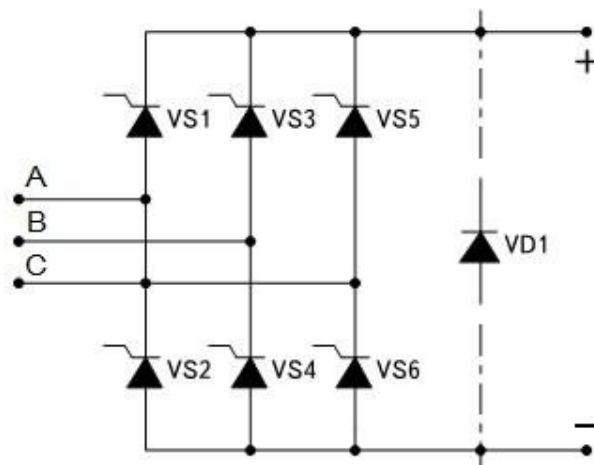


Рисунок 2.2 - Трёхфазное выпрямительное устройство (мост Ларионова) на тиристорах

Напряжение, подверженное выпрямлению, фактически не является постоянным, так как в нём всегда будут содержаться пульсации. С целью их устранения применяются специальные фильтры на основе конденсаторов, которые способствуют усреднению напряжения и снижению составляющих пульсаций.

После процесса фильтрации напряжение становится близким к постоянному, однако оно не способно применяться для заряда накопителей, так как это может вызвать возникновение внушающих токов в аккумуляторах, высокие значения

Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата

13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ

которых оказывают негативное воздействие на работу накопителей электрической энергии. В процессе использования свинцово-кислотных аккумуляторных батарей может возникнуть закипание электролита. При этом значительно снижается срок их эксплуатации. Повышенный уровень напряжения оказывает негативное влияние и на инвертор, подключаемый параллельно аккумуляторным батареям. По этой причине рациональным решением оказывается использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для осуществления конвертации одного уровня напряжения в другой. Для процесса генерации ШИМ применяется силовой транзистор, который работает в ключевом режиме, и система его управления. Система управления осуществляет подачу напряжения на вывод базы транзисторного элемента, при этом транзистор открывается и становится способным пропускать электрический ток, который в дальнейшем служит для зарядки ШИМ-фильтра, который состоит из индуктивности и ёмкости. При снятии напряжения с вывода базы транзисторного элемента он становится закрытым, и электрический ток прекращает протекать.

Параметром, который характеризует длительность открытого состояния транзистора, выступает коэффициент заполнения:

$$D = \frac{\tau}{T}, \quad (2.1)$$

где D - коэффициент заполнения;

τ - время существования импульса, с;

T - период цикла, с.

Исходя из этого, изменение выходного напряжения возможно осуществлять путем регулирования значения коэффициента заполнения.

Устройством, осуществляющим преобразование постоянного тока в переменный, является инвертор. В настоящее время производителями выпускаются

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		49

инверторы с различными значениями выходных напряжений, как правило кратными 12 В (значению номинального напряжения на элементах аккумуляторных батарей). С увеличением напряжения батарей происходит уменьшение уровня потребления электрического тока (при одной и той же величине мощности), вследствие чего в полностью автономных энергетических системах как правило широко применяются значения напряжений аккумуляторных накопителей и инверторов равные 48 В.

При наличии высоких скоростей ветрового потока, которые характерны для некоторых приморских и северных регионов, ветровая энергетическая установка может достигать скоростей вращения, которые способствуют ускорению их разрушения. При возникновении таких скоростей возможно проявление резонансных явлений, повышение уровня вибраций. Это планомерно приводит к механическому износу подшипниковых узлов, деформации мачты, разрушению лопастей и другим негативным последствиям. С целью недопущения раскручивания ветрового колеса ВЭУ свыше определённой величины скорости в структуре ветровой энергоустановки обязательно должно предусматриваться тормозное устройство. Помимо этого, для повышения уровня надёжности работы в случае возникновения аварийных ситуаций устройств торможения может быть несколько. Данное решение необходимо также для уменьшения нагрузки на каждое отдельное устройство торможения. Наиболее подробное описание разновидностей способов осуществления торможения представлено в пункте 1.4.

Функции управления режимами работы ветроэнергетической установки контролируются с помощью микроконтроллера. В качестве входных параметров микроконтроллерного устройства выступают текущие параметры ветровой установки.

С целью обеспечения условий нормального функционирования устройства управления ветроэнергетической установки, ему требуется получать входные данные о следующих параметрах:

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		50

– о температуре обмоток генератора. При возникновении перегрева генератора возможно проявление износа изоляции обмоток, а также появление контакта их между собой, что является недопустимым сценарием событий. Исходя из этого следует отключить нагрузку от генератора для прекращения протекания электрического тока, являющегося первопричиной возникновения перегрева обмоток генератора;

– о частоте вращения генератора, которая определяется непосредственно с помощью применения различных вариантов датчиков (например, датчиков положения на эффекте Холла), либо же рассчитывается на основе параметров конструктивного исполнения генератора. Таким образом, электродвижущая сила (ЭДС) генератора переменного тока определяется по следующему выражению [33]:

–

$$E = 4,44 \cdot \frac{p \cdot n}{60} \cdot \omega \cdot k_{об} \cdot k_c \cdot \Phi, \quad (2.2)$$

где E - действующее значение ЭДС фазы генераторного устройства переменного тока;

p - количество пар полюсов;

n - частота вращения, об/с.

ω - количество витков фазы;

$k_{об}, k_c$ - коэффициенты обмоток и скоса соответственно, как правило, их значения близки к 1;

Φ - магнитный поток одного полюса при синусоидальном распределении индукции, Вб.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		51

Если принять, что $C_E = 4,44 \cdot \frac{P}{60} \cdot \omega \cdot k_{об} \cdot k_c \cdot \Phi$, то уравнение (2.2) можно преобразовать к следующей формуле:

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n, \quad (2.3)$$

где E - действующее значение ЭДС фазы генератора переменного тока, В;

C_E - конструктивный коэффициент, В·с/Вб.

Уравнение второго закона Кирхгоффа (в случае неизвестности параметров генераторного устройства и при условии пренебрежения электродвижущей силой рассеяния и реакции якоря) принимает вид:

$$\dot{E} = \dot{U} + \dot{I} \cdot (R + j \cdot X_L) \quad (2.4)$$

где \dot{E} - комплексное значение ЭДС фазы генератора переменного тока, В;

\dot{U} - комплексное значение величины напряжения фазной обмотки, В;

\dot{I} - комплексное значение величины тока, А;

L - индуктивность, которая учитывает реакцию якоря и потоки рассеяния, Гн;

R - активное сопротивление фазной обмотки.

В случае упрощения, при условии пренебрежения влиянием реакции якоря, потоков рассеяния и сопротивления фазы генератора, можно в уравнении не учитывать L и R . В таком случае:

$$n = \frac{U}{C_E \cdot \Phi} \quad (2.5)$$

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		52

Так как значение выпрямленного напряжения диодного моста Ларионова в 2,34 раза превышает величину действительного значения напряжений фаз [34], то:

$$n = \frac{U_1}{2,34 \cdot C_E \cdot \Phi}, \quad (2.6)$$

где U_1 - выпрямленное напряжения диодного моста Ларионова.

– о текущей величине напряжения аккумуляторной батареи, которая требуется для отслеживания степени её заряда и возникновения необходимости отключения нагрузки с целью предотвращения чрезмерного разряда, либо прекращения процесса заряда постоянным током и поддержания постоянного напряжения на одном уровне;

– об электрическом токе, поступающим с устройства фильтрации ШИМ и ток, подаваемый на нагрузку напряжением 48 В (исключая аккумуляторные батареи) с целью правильной и точной оценки состояния текущего тока заряда накопительных элементов и предоставления информации потребителю;

– о текущем значении напряжения после фильтра для достоверного вычисления коэффициента заполнения ШИМ-сигнала;

– для алгоритмов векторного управления генераторным устройством. Поэтому целесообразным является применение наблюдателей за углом поворота ротора генераторной установки.

Данные сведения микроконтроллерное устройство получает посредством применения датчиков. Датчики способны преобразовать входное воздействие (напряжение, температуру, электрический ток и т.д.) в аналоговый, или же в цифровой сигнал. Преобразованный входной сигнал затем подается на входы (пины) микроконтроллера, где далее и обрабатывается. На основе полученных обработанных значений, микроконтроллер приводит в исполнение какое-либо

запрограммированное действие, после чего продолжает выполнение остальной части вычислений.

По причине того, что микроконтроллеры, как правило, способны обрабатывать достаточно низкие диапазоны величин напряжений (например, до 3,3 В), они не имеют возможности выполнять непосредственное управление цепями. С целью согласования уровней напряжений микроконтроллерного устройства и внешней по отношению к нему цепи используются промежуточные звенья - устройства согласования (УС). Помимо их основной функции - согласования, данные устройства способны осуществлять также передачу электрической энергии без наличия электрического контакта между ними, т.е. гальваническую развязку [35], либо организовать передачу лишь логического сигнала - оптопары. С помощью данного решения происходит повышение уровня надёжности системы, так как отсутствие работоспособности одного из устройств согласования не приводит к выходу из строя других элементов системы.

Микроконтроллеру для обеспечения функциональной деятельности необходим источник питания, который служит для поддержания определенной величины напряжения. Как правило, это небольшое значение напряжения, которое чаще всего равняется 3,3 В. По этой причине в структурной схеме требуется предусмотреть источник питания, способный осуществить процесс преобразования напряжения аккумуляторных батарей близко к значению напряжению питания микроконтроллерного устройства. В потреблении электроэнергии в качестве питания нуждаются также устройства согласования и различного рода датчики.

Структурная схема электроэнергетической системы ветровой энергоустановки приведена на рисунке А.1 приложения А. Основными составляющими её элементами являются:

- синхронный генератор на постоянных магнитах;
- неуправляемое выпрямительное устройство;
- фильтр выпрямителя, применяющийся для фильтрации пульсаций;

- силовой ключ (транзистор), осуществляющий процесс регулирования отбора мощности нагрузки путём изменения значения коэффициента заполнения ШИМ;
- устройство аварийного торможения. В качестве такого устройства возможно применять электромеханический тормоз;
- фильтр ШИМ, служащий для интегрирования ШИМ-импульсов;
- датчики тока D_{T1} , D_{T2} , производящие измерения токов, которые поступают на нагрузку целиком и во внешнюю цепь соответственно. Они производят процесс пропорционального преобразования уровня тока в напряжение, которое находится в диапазоне, допустимом для микроконтроллера;
- датчики напряжений D_{H1} , D_{H2} , которые требуются для оценки значений коэффициента заполнения ШИМ-сигнала, которые помимо этого осуществляют пропорциональное снижение уровня напряжений до пределов допустимого диапазона;
- датчик напряжения D_{H3} , который нужен в качестве средства получения информации о параметрах напряжений на аккумуляторной батарее накопительного блока;
- устройства согласования УС1,...УС4;
- блок питания (БП), который выполняет функции снабжения микроконтроллера, периферии датчиков и устройств согласования необходимым количеством электрической мощности. При возникновении необходимости в перечень функциональных возможностей блока питания может быть добавлено резервное питание. Данная функция требуется в случае полного разряда аккумуляторных батарей. В таком случае питание микроконтроллера и периферии необходимым электричеством осуществляется за счёт аварийного накопителя, который встроен в блок питания;
- датчик температуры, который может быть представлен в различных технических исполнениях - в виде обмотки из меди, изменяющей значение своего сопротивления при изменении величины температуры, либо же в виде

терморезисторов. Помимо основного устройства, которое реагирует на изменение температуры, датчики должны быть оснащены специальным устройством, способным преобразовывать электрический ток, проходящий непосредственно через датчик, в соответствующий ему уровень напряжения.

– к выходу рассматриваемой системы допускается подключать инвертор, который имеет номинальное значение входного напряжения 48 В, либо нагрузку постоянного тока. В случае, когда у инвертора отсутствует возможность защитного отключения при снижении уровня напряжения ниже заданного, в структурной схеме предусматривается наличие специального ключа K_1 , который осуществляет размыкание нагрузки с целью предотвращения чрезмерного разряда аккумуляторных батарей.

– с целью реализации функции информирования персонала о параметрах системы на структурной схеме ветроэнергетической установки предусмотрен специальный дисплей. С его помощью отображается актуальная информация о текущем состоянии всех датчиков в системе. Помимо этого, реализована возможность регулирования констант алгоритма, влияющих на работу микроконтроллера.

В итоге, структурная схема служит для осуществления отбора необходимых портов ввода и вывода микроконтроллерного устройства, а также для выделения его необходимого функционала.

2.2 Характеристики микроконтроллерного устройства и обоснование его выбора

В качестве микроконтроллерного устройства был выбран микроконтроллер компании ST STMF407VGT6. Данный тип микроконтроллера обладает достаточно широкими функциональными возможностями, высоким уровнем надежности работы, быстродействием и относительно низкой стоимостью.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		56

В данной модели микроконтроллера применяется 32-битная микропроцессорная архитектура ARM Cortex-M4 со встроенным арифметическим сопроцессором (FPU - floating point unit), Flash-память объемом 1 мегабайт, 192 килобайт оперативной памяти. Максимальная тактовая частота, на которой возможна нормальная работа данной модели микропроцессора, составляет 168 МГц. Данный микроконтроллер обладает следующим перечнем параметров:

- 32-битный микропроцессор ARM Cortex-M4;
- 1 мегабайт Flash-памяти;
- напряжение питания 1,8...3,6 В;
- поддержка DSP-инструкций (Digital Signal Processing - цифровая обработка сигналов);
- высокопроизводительная АНВ-матрица шин;
- модули отладки по протоколам SWD (Serial Wire Debug - отладка по последовательному соединению) /JTAG, модуль ETM (Embedded trace macrocell - встроенная макроячейка трассировки);
- частота тактирования 168МГц; 210 DMIPS (Dhrystone Mega Instructions Per Second - количество миллионов выполненных инструкций в секунду по тесту производительности Dhrystone); 1.25 DMIPS/МГц (Dhrystone 2.1);
- 15 таймеров (12 16-разрядных, два из которых способны генерировать ШИМ, и два 32-разрядных таймера общего назначения, 24-битный таймер ядра - SysTick);
- 192 + 4 кбайт (собственные регистры процессора) SRAM-памяти (Statistic Random Access Memory - статическая память с произвольным доступом);
- три 12-битных АЦП (аналого-цифровой преобразователь) на 24 входных канала (скорость до 7,2 мегасемплов, температурный датчик);
- возможность подключения внешнего источника тактирования 4...26МГц для микропроцессора и для RTC - 32,768кГц;

- DMA-контроллер (DMA - Digital Memory Access - доступ к памяти напрямую, т.е. происходящий в обход микропроцессора от устройств АЦП, ЦАП и др.) на 16 потоков с поддержкой пакетной передачи;
- два «сторожевых» таймера (watchdog - WDG и IWDG - таймеры, следящие за состоянием системы и ликвидирующие «зависания»);
- внутренние RC-генераторы на 16МГц и 32кГц (для RTC - Real-Time Clock - часы реального времени);
- два 12-битных ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь);
- контроллер SDIO (карты SD, SDIO, MMC, CE-ATA);
- FSMC-контроллер (Flexible Static Memory Controller - поддерживается подключение жидкокристаллических дисплеев LCD 8080/6800, а также работа с такими типами памяти как Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR, NAND);
- аппаратный генератор случайных чисел;
- различные модули шифрования;
- аппаратное вычисление CRC (Cyclic redundancy check - циклический избыточный код - алгоритм, который находит контрольные суммы и предназначенный для проверки целостности данных), 96-битный уникальный ID (идентификатор);
- расширенный рабочий температурный диапазон -40...105°C.

Данная модель микроконтроллерного устройства обладает следующим перечнем коммуникационных интерфейсов:

- USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter - универсальный синхронный/асинхронный передатчик/приёмник - узел, который предназначается для организации связи с другими цифровыми устройствами);
- I2S (Inter-Integrated Sound - стандарт интерфейса электрической последовательной шины, который применяется для соединения цифровых аудиоустройств);

- USB 3.0 FS/HS OTG - возможность работы с периферией USB, в том числе с flash-накопителями и подключение устройств по технологии OTG (On-The-Go);
 - CAN (Controller Area Network) - стандарт промышленной сети, который является ориентированным на объединение в единую сеть различных исполнительных устройств и датчиков;
 - 10/100 Ethernet MAC (технология пакетной передачи данных);
 - интерфейс цифровой камеры (8/10/12/14-битные режимы);
 - I²C (Inter-Integrated Circuit - последовательная шина данных для связи интегральных схем, использующая две двунаправленные линии связи);
 - SPI (Serial Peripheral Interface - последовательный периферийный интерфейс - последовательный синхронный стандарт передачи, который служит для обеспечения простого и недорогого сопряжения микроконтроллеров и периферии).
- [36]

Для обеспечения реализации предложенного алгоритма поиска (подраздел 2.7) потребуется задействовать следующие виды периферии микроконтроллерного устройства:

- 6 каналов одного АЦП (датчик температуры, 3 датчика напряжения, 2 датчика тока - согласно структурной схеме). Для реализации функции быстрого переноса данных с 6 каналов АЦП в память оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) устройства рациональным подходом будет использование DMA для того, чтобы избежать излишней загруженности процессора и обеспечить перенос данных напрямую. Данные будут передаваться в виде массива, после чего над ними можно будет проводить операции усреднения;
- 1 таймер. Основная функция таймера заключается в генерации прямоугольных импульсов с заданным коэффициентом заполнения с целью обеспечения управления силовым ключом силового транзисторного элемента. Для этой цели один из каналов таймера настраивается на вывод в режиме ШИМ. Помимо этого, таймеру необходимо будет вызывать прерывания, которые будут

адресованы микроконтроллеру. В процессе этих прерываний микроконтроллерное устройство будет выполнять подпрограмму, служащую для изменения коэффициента заполнения, основываясь на данных, полученных с 6 каналов АЦП. Второй канал таймера задействуется с целью формирования ШИМ для осуществления плавного торможения. Коэффициент заполнения будет линейно нарастать в течение некоторого заданного промежутка времени, после чего торможение будет прекращено;

– 4 ввода/вывода общего назначения (GPIO - general purpose input-output). К ним относятся 2 ввода - это кнопки, которые служат для изменения констант, 2 вывода - вывод необходим для подачи сигнала на устройство экстренного торможения и на устройство, которое размыкает ключ коммутации нагрузки;

– 2 канала служат для последовательного интерфейса обмена данными I²C, для подключения дисплея и вывода информации о текущем состоянии периферийных устройств на экране.

Исходя из вышеописанного, можно сделать вывод, что требуемые параметры полностью удовлетворяются техническими характеристиками выбранного микроконтроллера.

2.3 Обзор программного обеспечения, необходимого при разработке программы микроконтроллера

В качестве основного программного обеспечения, необходимого для разработки программного кода, применяется IDE (Integrated Development Environment - интегрированная среда разработки). Современные IDE представляют собой программный комплекс, который способен осуществлять широкий функционал и решать огромное количество задач, возникающих в процессе разработки программного обеспечения. Как правило, среда разработки включает в себя большое число функций и встроенных подпрограммных модулей, к которым можно отнести:

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		60

– текстовый редактор с функцией подсветки синтаксиса кода, возможностями автоматического дополнения вводимого программного кода, поиска различных элементов и блоков, быстрым доступом к объявлению функций и классов, поддержки отображения кода в разделенном окне, возможность одновременной работы с несколькими открытыми файлами и т.д.;

– компилятор и/или интерпретатор - программа, осуществляющая трансляцию языка высокого уровня (на котором обычно написана программа человеком (например, Rust), в язык, понятный вычислительному устройству;

– средства, осуществляющие автоматизацию сборки исполняемого модуля программы (например, линкер - программа, осуществляющая компоновку);

– отладчик, который предназначен для осуществления обнаружения ошибок в исходном коде программного кода. Он способен осуществлять отображение текущего состояния и значений переменных в коде, пошагово выполнять программный модуль, устанавливать в определенных местах кода точки прерываний (breakpoints) и др. [37-41].

Производителями программного обеспечения разрабатываются несколько различных IDE, служащих для создания программ, в том числе и для микроконтроллера STM32F407VGT6. Как правило, данные средства разработки включают в себя весь описанный выше функционал. Корпорация-производитель STMicroelectronics, выпускающая данную модель микроконтроллерного устройства, рекомендует применять в процессе работы следующие наименования интегрированных средств разработки:

- IAR: EWARM;
- Keil: MDK-ARM;
- Atollic TrueSTUDIO.

В качестве используемой среды разработки выбирается IAR: EWARM. Данная IDE является достаточно надёжным инструментом разработки, с осуществлением быстрой компиляцией на компьютерах малой мощности, а также с возможностью бесплатного 30-дневного периода использования, или же полностью бесплатной

версией, но с ограничением объёма кода. Такое решение позволяет воспользоваться полным функционалом программной среды без финансовых затрат, однако оно применимо лишь для небольших проектов.

Для осуществления удобства конфигурирования периферии микроконтроллерного устройства (АЦП, портов ввода-вывода и т.д.) корпорация STMicroelectronics рекомендует применять собственно разработанный программный продукт - STM32CubeMX. Данная программа представляет собой визуальное представление периферии микроконтроллерного устройства, конфигурации частот работы периферии, назначение ножек (пинов) микроконтроллера и т.д. Все это позволяет существенно упростить разработку программного обеспечения, а также визуально представить процесс. Результатом работы программы является файл, содержащий данные о конфигурации периферии, помимо этого существует возможность создать целый проект для различных сред разработки. В проекте содержатся все необходимые файлы, среди которых имеются библиотеки. Все файлы удобно размещены по директориям, в исходном коде программного продукта уже имеются функции инициализации и минимальный уровень настройки компонентов периферийных устройств.

С целью упрощения процесса создания программного обеспечения производитель STMicroelectronics предлагает собственно разработанные библиотеки по работе с периферией. Библиотека представляет собой набор предварительно созданных функций, которые дают возможность в дальнейшем использовать их при написании программ. Библиотеки создаются с целью упростить взаимодействие разработчика с микроконтроллерным устройством. Это позволяет разработчикам программного обеспечения сосредоточиться на функционале своего программного продукта без углубления в технические параметры и особенности микроконтроллера, а также его периферии.

Таким образом, в качестве основной программы для разработки в данной выпускной квалификационной работе используется среда разработки IAR: EWARM и вспомогательный программный продукт по настройке периферии

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		62

STM32CubeMX. По умолчанию в данной среде разработки предустановлен компилятор языков C и C++, однако существуют модули, позволяющие осуществлять разработку на языке программирования Rust.

2.4 Конфигурирование периферии микроконтроллера в программе STM32CubeMX

На рисунке Б.1 приложения Б приводится изображение окна работы программы, в которой осуществляется назначение пинов микроконтроллерного устройства. Ножки настраиваются на необходимые режимы работы и для подключение различной периферии с помощью программы STM32CubeMX.

STM32CubeMX - это графический программный инструмент, который позволяет с большим уровнем удобства и быстродействия осуществлять конфигурирование микроконтроллерного устройства и микропроцессоров STM32. Помимо этого данное программное обеспечение способен производить процесс генерации соответствующего кода инициализации Rust для ядра ARM-архитектуры и Cortex-M.

Первый этап заключается непосредственно в выборе разновидности микроконтроллерного устройства или микропроцессора STMicroelectronics STM32, который будет соответствовать необходимому набору периферийных устройств.

Для микропроцессорных устройств второй этап позволяет осуществлять конфигурирование GPIO и настройку часов для всей системы, а также интерактивно назначать периферийные устройства. Специализированные программные утилиты, такие как конфигурация и настройка DDR, позволяют упростить начало работы с микроконтроллерами STM32. Для архитектуры ядра Cortex-M конфигурация включает в себя дополнительные этапы, которые

необходимы для полноценного и бесперебойного функционирования всей системы.

Второй этап для микроконтроллерных и микропроцессорных устройств на архитектуре ARM и Cortex-M заключается в проведении процесса настройки каждого требуемого встроенного программного обеспечения с помощью применения средств разрешения конфликтов распиновки, помощника конфигурации тактового дерева, калькулятору потребления электрической энергии и специализированной утилите, которая осуществляет настройку периферийных устройств (такие как GPIO или USART) и стеки промежуточного программного обеспечения (такие как USB или TCP / IP).

В завершающем этапе пользователь выполняет запуск процесса генерации, которая полноценно соответствует выбранным вариантам конфигурации аппаратной части системы. На данном этапе предоставляется код инициализации Rust для ARM и Cortex-M, готовый для использования и редактирования в различных интегрированных средах разработки.

STM32CubeMX поставляется в составе STM32Cube.

Для каждой ножки программа дает возможность определить своё мнемоническое название, которое далее может быть использовано в процессе создания программного кода. Метаданные об определении мнемонических названий содержатся в специальном файле, создаваемом при инициализации проекта.

STM32CubeMX позволяет осуществлять настройку частоты работы периферии микроконтроллера - шин тактирования APB1, APB2 (и устройств, которые подключены к этим шинам), а также частоты таймеров. Конфигурирование частот тактирования, настроенное с применением программы STM32CubeMX, изображена на рисунке Б.2 приложения Б. В качестве исходного сигнала применяется внутренний осциллятор с частотой тактирования 8 МГц. После этого сигнал от него несколько раз делится и умножается во внутренних устройствах, что даёт возможность подавать частоту 42 МГц на шины APB1 и частоту 84 МГц на

шину APB2. Таймер TIM4, который задействуется для генерации ШИМ, подключен к шине APB1. Перед подачей на вход таймера частота удваивается, исходя из чего, таймер 4 работает при частоте 84 МГц. Используемый АЦП подсоединён к шине APB2, следовательно, он обладает частотой шины APB2 - 84МГц.

Программа STM32CubeMX позволяет настраивать и режимы работы периферии. Таким образом, таймер 4, используемый в качестве генератора ШИМ и для создания прерывания, во время существования которого происходит вызов функции изменения коэффициента заполнения ШИМ, должен обладать периодом счёта (максимальным числом, досчитав до которого, таймер сбросится), который вычисляется по формуле:

$$T = \frac{f_{APB1}}{f_{PWM}} - 1, \quad (2.7)$$

где T - число, до которого таймер производит счёт (количество тиков - временных интервалов, равных периоду тактирования таймера);

f_{APB1} - частота шины тактирования APB1, равная 84 МГц;

f_{PWM} - частота ШИМ, принятая равной 20 кГц.

$$T = \frac{84000000}{20000} - 1 = 419$$

Изначальное значение величины длительности импульса ШИМ, измеряемое в тиках, должно быть равным 0. Режим счёта - «вверх», то есть со стартового числа, равного 0, до $T = 4199$. Помимо этого, требуется разрешить генерацию прерывания от таймера при возникновении у него перегрузки (при переполнении таймера). Предделитель принимается равным 0, так как число T оказалось меньшим, чем

максимально возможное число счёта таймера, для которого можно записать регистр данного таймера - 65535.

Конфигурацию АЦП также можно осуществить в программном продукте STM32CubeMX. Для реализации обхода микропроцессора в записи данных непосредственно в память применяется DMA (Direct Memory Access - доступ в память напрямую). Данное решение позволяет минимизировать нагрузку на процессор, при этом основной поток данных будет проходить из АЦП в память RAM. С целью увеличения точности и устойчивости к помехам АЦП, а также для нивелирования флуктуации в измерениях, обусловленных внутренними процессами, которые протекают внутри АЦП, производится измерение значения 6 каналов большое количество раз и запись всех полученных значений со всех каналов в один массив, расположенный в памяти. Рациональным решением является использование в качестве примера 1024 измерений на канал. Это связано с тем, что числа, которые являются результатом возведения 2 в некоторую степень удобны для вычислений микропроцессором и требуют меньшее число операций. Данный механизм объясняется тем, что деление на такого рода числа производится простым сдвигом реестра. Целесообразно применять как меньшие числа, являющиеся результатом возведения 2 в некоторую степень (например, 512), так и большие (например, 2048). Однако стоит учитывать, что маленькое число измерений ведет к возникновению погрешности и колебаниям величины отсчётов, а большое - к существенному увеличению времени, которое необходимо для осуществления измерения. После получения массива, его можно усреднить или отфильтровать для того, чтобы получить 6 конечных значений, которые впоследствии будут использованы для работы основной подпрограммы.

АЦП и DMA данной модели микроконтроллера обладают несколькими режимами работы между собой. Для обеспечения правильного функционирования АЦП требуется сконфигурировать его определенным образом. Необходимо, чтобы обеспечивалось последовательное чтение 6 каналов АЦП (Scan Mode в настройках АЦП). Помимо этого, после каждого заполнения 6 значений в массиве, требуется

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		66

заново выполнить чтение 6 каналов (эту задачу позволяет решить параметр Continuous Mode в настройках АЦП) - до тех пор, пока это необходимо DMA. В свою очередь DMA требуется установить в режим Normal, что означает, что будет отключена функция повторной записи в памяти при переполнении массива. Также требуется настроить инкрементирование, то есть увеличение на единицу, адреса ячейки, в которую DMA осуществляет запись.

Таким образом, с применением программного обеспечения STM32CubeMX производится настройка основной периферии, которая требуется для полноценной работы разрабатываемой программы.

2.5 Обработка входного массива данных для получения действительных измеряемых значений

Вследствие протекания процессов, происходящих внутри АЦП, возникают постоянные небольшие изменения измерений даже при условии постоянства внешних измеряемых величин. Преследуя цель усреднить и повысить точность измерений АЦП, в разрабатываемой программе применяется медианная фильтрация, которая является одним из видов цифровых фильтров, часто применяющийся в цифровой обработке сигналов при осуществлении фильтрации зашумлённых изображений [42]. Медианная фильтрация является быстрым и малозатратным (с точки зрения потребления ресурсов микроконтроллерного устройства и, соответственно, затрачиваемого на обработку времени) методом устранения шумовых возмущений. Результатом функционирования медианного фильтра является некоторое значение, которое находится в центре упорядоченного массива. Такой случай мало изменяющегося массива может рассматриваться в качестве среднего значения.

Медианой последовательности, состоящей из n количества элементов, называется элемент, величина которого меньше или равна половине n количества элементов и больше или равно оставшейся половине последовательности. Как правило, в целях осуществления поиска медианы массив необходимо упорядочить;

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		67

в таком случае медиана располагается в середине массива. Но всё же сортировка - достаточно медленный и требовательный к вычислительным ресурсам алгоритм, что негативно сказывается на времени работы программного кода. Алгоритм, который предложил А. Бхаргава в книге «Грокаем алгоритмы» [43], основанный на алгоритме разделения и используемый в алгоритме быстрой сортировки Ч. Хоара, не осуществляет сортировку, а лишь выполняет перестановку элементов массива. В результате таких манипуляций исходный массив изменяется, но в отличие от алгоритма быстрой сортировки, в нем не присутствует рекурсия, что позволяет получить существенный выигрыш в объёме потребляемой оперативной памяти. [44]. Данный алгоритм, исходя из проведённых тестов производительности различными методами поиска медианы, приведённом в статье «Fast median search: an ANSI C implementation» [42], признан способом с наибольшим быстродействием из всех рассмотренных.

В программе применяется алгоритм, который предложен в книге [44] и тестируемый в статье [42], с учётом изменений особенностей получаемого с АЦП массива, где значения любого из каналов повторяются каждые 6 раз и тем самым образуют 6 подмассивов. Данное решение позволяет существенно повысить точность определения и скорость поиска медианной величины. После выполнения функция медианной фильтрации возвращает массив, который содержит 6 медиан каждого из подмассивов, полученного с АЦП.

После получения массива, предварительно возникает необходимость отреагировать те отсчёты, которые способны быть следствием возникновения аварийных ситуаций. Особенностью АЦП, используемого в данной модели микроконтроллерного устройства, является неравенство нулю значений, получаемых на каналах АЦП при отсутствии входного сигнала, к примеру, от датчиков, на которых произошел обрыв. Помимо этого, в ветроэнергетических установках могут возникать внештатные ситуации, в результате которых по каким-либо причинам измеряемое значение превышает максимально допустимое расчётное значение. В случае, если на одном из каналов наблюдается числовое

значение, которое не входит в основной диапазон измерений, то есть является меньше некоторого порогового значения, либо же больше другого порогового, возникает необходимость остановить ветровую энергоустановку электромеханическим способом. При этом следует уведомить персонал о возникновении аварийной ситуации путём отображения предупреждающего сообщения на экране. В противном случае управление ветроэнергетической установкой будет осуществляться, основываясь на заведомо неверных данных, что может привести к выходу электрического оборудования из строя. Кроме того, в функциональных возможностях датчиков требуется предусматривать наличие некоторого опорного напряжения с целью определения обрыва даже при минимальном измеряемом значении.

После проведения проверки на принадлежность каждого элемента массива, содержащего измеренные отсчёты, измеренные АЦП («сырые» отсчёты), требуется перейти к отсчётам, которые измеряются в физических единицах измерениях (действительные отсчёты). Взаимосвязь между «сырыми» и действительными данными является линейной для всех датчиков. В датчиках тока и напряжения нашли широкое применение операционные усилители, обеспечивающие усиление линейного характера. Датчики температуры как правило оснащаются медными катушками с большим количеством витков. При этом сопротивление медной катушки подвергается изменению при изменении температуры по следующему закону:

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t - 20)) \quad (2.8)$$

где R – величина сопротивления проводника при его текущей температуре;

R_{20} – величина сопротивления проводника при температуре 20°C;

α - температурный коэффициент сопротивления, который зависит от химических свойств металла;

t – величина текущей температуры проводника.

Формула (2.8) показывает, что изменение температуры проводника носит линейный характер.

Реализованный в программном коде алгоритм находит действительное значение тока, которое получается с датчиков с применением следующей формулы:

$$I = \frac{(I_{\max} - I_{\min}) \cdot (x - x_{\max})}{(x_{\max} - x_{\min})} + I_{\max}, \quad (2.9)$$

где I - текущее действительное значение тока, которое рассчитывается на основании «сырых» отсчётов АЦП, А;

I_{\max} - максимальное возможное измеряемое значение, которое получается с датчика тока, т. е. верхний предел диапазона измерений датчика, А;

I_{\min} - минимальное возможное измеряемое значение, получаемое с датчика тока, то есть нижний предел диапазона измерений датчика, А;

x - текущий «сырой» отсчёт АЦП, который требуется преобразовать, бит;

x_{\max} - максимально возможный «сырой» отсчёт АЦП, то есть верхний предел измерений АЦП, бит.

2.6 Отображение информации и пользовательская корректировка изначально заданных значений

С целью отображения текущих входных данных, которые поступают с датчиков, а также показа ошибок и отображения конфигурации параметров алгоритма работы, к микроконтроллерному устройству подключается дисплей, основанный на контроллере HD44780 производителя Hitachi. Контроллер HD44780 производства корпорации Hitachi фактически является промышленным стандартом

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		70

и обладает широким применением при выпуске алфавитно-цифровых жидкокристаллических (ЖКИ) модулей. Аналогичные этому контроллеру модели или же совместимые с ним по интерфейсу и программному языку микросхем, выпускают большое количество компаний, среди которых: Samsung, Sanyo, Epson, Toshiba, Philips. Данные модули обрели обширную область применения в самых разнообразных видах технических устройств: в офисной технике, в медицинском оборудовании, в электронных устройствах, в измерительных приборах и автоматике, в технологическом оборудовании промышленной направленности.

Алфавитно-цифровые ЖКИ-модули обладают низкой стоимостью и удобным решением, позволяющее снизить временные и ресурсные затраты при осуществлении процесса разработки новых продуктов. При этом жидкокристаллические модули имеют возможность обеспечивать корректное отображение большого объема данных с сохранением хорошего качества и низкий уровень потребления электрической энергии от источника питания. Возможность оснащения данных модулей фоновой подсветкой обеспечивает эксплуатацию их в условиях с пониженным или нулевым уровнем освещенности, а исполнение с расширенным диапазоном температур (от -20°C до $+70^{\circ}\text{C}$) в сложных условиях работы, в том числе в портативной, полевой или же в бортовой аппаратуре.

Производителями выпускаются несколько различных стандартных форматов жидкокристаллических модулей (символов \times строк): 8×2 , 16×1 , 16×2 , 16×4 , 20×1 , 20×2 , 20×4 , 24×2 , 40×2 , 40×4 . Производятся и менее распространенные форматы: 8×1 , 12×2 , 32×2 и т.д. Каких-либо принципиальных ограничений на количество и комбинации отображаемых символов микроконтроллерное устройство не накладывает – ЖКИ-модуль способен отображать любое количество символов в пределах от 1 до 80. [45].

В данной выпускной квалификационной работе применяется связка ЖК-индикатора, размерность которого составляет 40×2 , с контроллером HD44780. Данный тип контроллера поддерживает параллельную передачу данных (информация передаётся по нескольким контактам), что является не рациональным

решением, так как при этом задействуются 16 ножек основного микроконтроллерного устройства STM32F4VGT6. Учитывая тот факт, что основной микроконтроллер оснащён поддержкой последовательного интерфейса передачи данных I²C, целесообразным решением будет задействовать его для передачи данных. С целью согласования интерфейсов применяется расширитель портов, который представляет собой плату, преобразующую интерфейс I²C в параллельный интерфейс микроконтроллерного устройства дисплея и наоборот, так как микроконтроллер HD44780 оснащен поддержкой двунаправленной передачи данных PCF8574 производства компании Philips.

Для осуществления изменения конфигурации алгоритма управления применяются 2 кнопки, которые подключаются к вводам общего назначения. Их различные комбинации позволяют выполнять функцию пролистывания (в случае единичного нажатия) экрана, а двойное нажатие позволяет осуществить переход к режиму настроек и конфигурирования. В таком режиме единичное нажатие на кнопки выполняет функцию перемещения между изменяемыми параметрами алгоритма, двойное нажатие позволяет перевести дисплей в режим изменения настроек, при котором для пользователя становится возможным самостоятельно настроить любой требуемый параметр, изменяя его значение правой и левой кнопкой (больше и меньше соответственно). Помимо настроек, которые конфигурирую алгоритм, поддерживается возможность производить настройку отладочной информации: времени работы, включение и отключение режима отображения ошибок и прочее.

2.7 Разработка алгоритма работы в программном виде

Исходя из структурной схемы (рисунок А.1 приложения А), алгоритм работы микроконтроллера должен выполнять несколько функций:

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		72

– осуществлять оптимальный процесс заряда аккумуляторных батарей методом «I-U» сперва постоянным током в $0,1 \cdot C$, а затем - постоянным напряжением;

– не допускать переход установки в режим работы с оборотами, превышающими определенное значение, а также осуществлять экстренное торможение в случае возникновения необходимости. Так как структурная схема не предусматривает наличие датчика частоты, то текущая частота рассчитывается по выпрямленному напряжению U_1 по выражению (2.6). При этом, поскольку параметры генератора неизвестны, принимается, что количество пар полюсов $p = 25$, число витков в фазе $\omega = 300$, $k_{об} \cdot k_c = 1$. Тогда конструктивный коэффициент равен:

$$C_E = 4,44 \cdot \frac{25}{60} \cdot 300 \cdot 1 = 555$$

Поток одного полюса магнита ротора синхронного генератора принимается постоянным по направлению и равным значению $\Phi = 0,08$ Вб. Коэффициент пропорциональности между напряжением U_1 и частотой вращения n составляет:

$$k = \frac{1}{2,34 \cdot C_E \cdot \Phi} \quad (2.10)$$

$$k = \frac{1}{2,34 \cdot 555 \cdot 0,08} = 0,01$$

Уравнение зависимости между значением частоты вращения генератора и напряжением (для упрощения принимается линейным):

$$n = k \cdot U_1 \quad (2.11)$$

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		73

При возникновении необходимости, возможно осуществить изменение этой константы в программе. Помимо этого, существует возможность выполнять корректировку программного кода, отключать режим пропорционального расчёта частоты вращения и перехода к данным, которые получаются извне (например, с датчиков Холла). Данное решение помогает достигнуть следующих целей:

- не допускать возникновения перегрева ВЭУ, при появлении признаков перегрева осуществлять установку коэффициента заполнения D равным 0 и остановку всей ветроэнергетической установки электромеханическим тормозом;
- осуществлять торможение постепенно, не допуская скачкообразных перебросов фронта, а с помощью ШИМ, в течение некоторого периода времени увеличивать значение коэффициента заполнения;
- при низких величинах напряжений на накопительном элементе производить отключение выхода нагрузки ключом K_1 и переходить в особый режим потребления питания от резервного источника и дальнейшего ожидания появления требуемого по уровню напряжения U_1 . При этом необходимо не допускать «мерцания» нагрузки при отключении и подключении дополнительных мощностей по причине неодинаковости напряжения аккумуляторов при разных подключенных мощностях;
- не допускать чрезмерного заряда аккумуляторных батарей;
- не допускать превышения значения максимального напряжения U_2
- отслеживать текущие данные о периферии датчиков и выводить информацию на дисплей в виде таких параметров как отсутствие сигнала с датчиков, перегрев, превышение частоты вращения и др., представленных в таблице 2.1, выполнять взаимодействие с пользователем посредством внесения изменений исходных параметров алгоритма и настроек;
- осуществлять функцию диагностики внешней цепи на обрыв.

Таблица 2.1 - Возможные ситуации и необходимые действия микроконтроллера

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		74

Возможная ситуация	Необходимые действия	Примечание
$T_{GEN} > T_{GENMAX}$	$D = 0$, электромеханический тормоз	Перегрев генератора
$U_1 > U_{1MAX}$	Электромеханический тормоз	Превышена допустимая частота вращения. Программа ввиду отсутствия датчика частоты ориентируется на U_1 .
$U_2 > U_{2MAX}$, но $U_2 < U_{2MAXINV}$	Выставить $D = \frac{U_{2MAX}}{U_1}$	Полный заряд аккумуляторных батарей
$U_2 > U_{2MAXINV}$	Выставить $D = D - 2 \cdot \Delta D$, если $D \geq 2 \cdot \Delta D$	Превышено допустимое напряжение на выходе
$U_1 > 0, D > 0, U_2 = 0$	Электромеханический тормоз	Обрыв цепи

Основной разработанный алгоритм работы микроконтроллерного устройства способен оперировать следующими параметрами:

1. Переменные величины значений, получаемые с датчиков:

- выпрямленное напряжение U_1 ;
- напряжение после ШИМ U_2 ;
- ток, который поступает с ШИМ (суммарный ток, поступающий на нагрузку)

$I_{НАГР}$;

- ток, который поступает на выход (в инвертор) $I_{ВЫХ}$;
- напряжение на аккумуляторах $U_{АКБ}$;
- значение температуры генератора T_{GEN} .

2. Постоянные или изменяемые оператором величины:

– добавка к уровню напряжения ΔU , которая служит для осуществления компенсации возможной просадки напряжения генераторного устройства при подключении нагрузки;

– минимальное допустимое значение напряжения на аккумуляторных батареях накопительного элемента, при которых поддерживается их функционирование без наличия деградации U_{MIN} ;

– максимальное допустимое значение напряжения на аккумуляторных батареях накопителя, при котором сохраняется их работоспособность $U_{АКБМАХ}$;

- максимальная величина напряжения после фильтра ШИ-модулятора U_{2MAX} ;
 - максимальное допустимое значение выпрямленного напряжения U_{1MAX} ;
 - величина абсолютной погрешности тока заряда, которая допускается при осуществлении процесса заряда аккумуляторных батарей накопительного элемента ΔI ;
 - величина ёмкости аккумуляторной батареи накопителя, на основе которой вычисляется допустимое значение тока заряда, C ;
 - шаг приближения коэффициента заполнения ШИ-модулятора к оптимальному или допустимому значению - ΔD ;
 - некоторое изначально заданное U_{TH2} , которое несколько превышает U_{MIN} и является одним из условий подключения нагрузки;
 - максимальная величина температуры генератора T_{GENMAX} ;
3. Управляемые (изменяемые) величины:
- коэффициент заполнения ШИ-модулятора, первоначально вычисляемый по формуле:

$$D = \frac{U_{AKB} + \Delta U}{U_1}, \quad (2.12)$$

где D - коэффициент заполнения.

В общих чертах алгоритм представлен на рисунке В.1. Его представление описывается в виде нескольких частей:

1. Предварительные действия. К ним относятся процесс запуска АЦП, получение массива данных, осуществление остановки АЦП, медианная фильтрация полученных массивов. Данные преобразования были рассмотрены в подразделах 2.4 и 2.5.

2. Проведение анализа аварийных ситуаций датчиков и составных частей автономной энергетической системы. Выполняется проверка на принадлежность текущих отсчётов заданному диапазону измерений в соответствии с подразделом 2.5. Таким образом, отсчёты, находящиеся в пределах (0...500) и (3900...4095) интерпретируются как возникновение обрыва на линии датчика и программный алгоритм осуществляет определённый порядок действий: отключение нагрузки, торможение ветрового колеса электромеханическим способом до полной остановки, значение коэффициента заполнения выставляется равным 0. Отсчёты, которые лежат в диапазонах (500...700) и (3700...4095) «притягиваются», то есть принимаются равными крайним границам (700 и 3700 соответственно). В таком случае ошибка не возникает и последующее аварийное отключение не происходит. После этого производится вычисление физических значений измеряемых величин. Далее программа осуществляет процесс диагностики состояния внешних устройств. Это достигается проверкой текущих данных датчиков в соответствии с таблицей 2.1. Блок-схема данной части алгоритма работы приводится на рисунке В.2.

3. Расчёт D исходя из текущих внешних условий. Далее следует сравнение токов: выдаваемого фильтром ШИ-модулятора (питающего нагрузку целиком - аккумуляторные батареи и выход) $I_{НАГР}$ и потребляемого нагрузкой $I_{ВЫХ}$ (за вычетом аккумуляторных батарей):

- если $I_{НАГР} > I_{ВЫХ} + 0,1 \cdot C + \Delta I$, то это означает, что при данном выставленном D ветроэнергетическая установка генерирует больше, чем нужно нагрузке и аккумуляторным батареям для их заряда. В таком случае следует снизить значение коэффициента заполнения $D = D - \Delta D$;

- если $I_{НАГР} < I_{ВЫХ} + 0,1 \cdot C - \Delta I$, то это значит, что при данном выставленном значении D аккумуляторные батареи заряжаются недостаточно большим током, либо разряжаются. В данном случае требуется проверить, найдена ли точка максимума мощности. Если же она не найдена, то вызывается алгоритм Р&О, описанный в пункте 1.3, в ином случае изменения значения D не происходит;

– если указанные выше условия не выполняются, величина коэффициента заполнения D не подвергается изменению, так как все токи находятся в оптимальных диапазонах.

Блок-схема данной части работы алгоритма приводится на рисунке В.3 приложения В.

4. Включение или отключение ключа K_1 , который служит для отсоединения и подключения нагрузки. Это требуется для эффективного функционирования аккумуляторных батарей и максимально возможного продления их ресурса работы. В том случае, если аккумуляторные батареи разряжены ниже некоторого предела, следует отключить нагрузку, коммутируемую ключом K_1 с целью недопущения процесса последующего разряда. Блок питания получает питание от резервного источника питания. Требуется помимо этого учитывать, что при отключении нагрузки напряжение аккумуляторов повысится. Данное повышение может способствовать возникновению повторной коммутации цепи с последующим уменьшением величины напряжения. В итоге будут осуществляться процессы подключения и отключения нагрузки до тех пор, пока уровень заряда аккумуляторных батарей не упадёт до нуля. С целью устранения таких мерцаний в программный код внесён алгоритм, способный адаптивно изменяться в зависимости от изменения напряжения аккумуляторных батарей.

В процессе работы этой части алгоритма, блок-схема которой представлена на рисунке В.4, сначала осуществляется проверка на факт взведения индикаторного флага запуска таймера. Таймер служит для создания защитного «буферного» времени, в течение которого нагрузка становится не способной быть подключённой. Если флаг взведен, то нагрузка отключается (то есть значение соответствующего пина микроконтроллерного устройства, отвечающего за коммутацию ключа K_1 , будет снова выставлено в положение «отключено»). Если же флаг не взведён, то осуществляется сравнение текущего напряжения аккумуляторов $U_{АКБ}$ с минимально допустимым значением U_{MIN} . Если значение напряжения аккумуляторной батареи выше минимума, то выполняется проверка на

включение нагрузки (включена ли нагрузка в данный момент). В случае, при котором осуществлялось включение нагрузки, то величина соответствующей ножки микроконтроллерного устройства остается без изменений. В ином случае осуществляются две проверки: сравнение текущего значения напряжения аккумуляторных батарей с некоторым базовым изначально заданным U_{TH2} и производится анализ текущего выставленного значения коэффициента заполнения D . Так как подключение нагрузки является целесообразным при достаточном заряде аккумуляторных батарей накопителя, а также при наличии функции заряда аккумулятора внешним источником питания (генератор ветровой энергоустановки). В случае невыполнения хотя бы одного из указанных условий нагрузка будет автоматически отключена.

После успешного осуществления сравнения, если напряжение на ветроэнергетической установке не превышает U_{MAX} , микроконтроллерное устройство запускает процесс сканирования на наличие выпрямленного напряжения U_1 , которое должно иметь большее значение, чем величина напряжения на аккумуляторных батареях накопительного элемента. Как только данное напряжение генерируется (силы потоков ветра достаточно для раскручивания ветроэнергетической установки до нужного значения), производится активация ШИМ, коэффициент заполнения которого в первом приближении вычисляется по формуле (2.12).

Листинг программного кода на языке Rust функции, осуществляющей расчёт коэффициента заполнения D , приведен в приложении Г.

Данный алгоритм позволяет оптимально и гибко подстраиваться под изменяющиеся условия внешней среды (подключение и отключение нагрузки, изменение скорости потоков ветра и т.д.), а также осуществляет диагностику подключенных устройств. Изначально частота вычисляется на основе формулы (2.8), однако, она может поступать из внешней периферии (других датчиков), либо с применением иных вычислений. Для осуществления такого варианта необходима незначительная корректировка кода программы.

Выводы по разделу 2

В разделе 2 был выполнен синтез структурной схемы автономной системы энергоснабжения, которая применяет ветроэнергетическую установку в качестве источника электроэнергии. При этом был произведён выбор типов датчиков, которые требуются для осуществления анализа состояния энергетической системы. С целью осуществления управления применяется микроконтроллерное устройство STM32F407VGT6 и программные продукты, необходимые для написания программного кода и настройки конфигурации выбранного микроконтроллера. Помимо этого, была произведена настройка в выбранном программном обеспечении; осуществлён выбор математического аппарата, который требуется для осуществления реализации функции осреднения входных данных датчиков; выполнен анализ необходимых действий при обработке входных данных; произведён выбор жидкокристаллического индикатора и способ его подключения. Также была произведена разработка действующего алгоритма, основанного на существующих методах, который осуществляет процесс отслеживания точки максимальной мощности. Данный алгоритм работы в программном виде был успешно реализован с помощью языка программирования высокого уровня Rust.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		80

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ

3.1 Характеристика и параметры платы STM32F4Discovery

С целью проведения отладки и тестирования программного кода, а также экспериментального подтверждения правильности её работы применялась плата STM32F4Discovery, разработанная корпорацией ST Microelectronics. На плате располагается рассмотренное ранее микроконтроллерное устройство STM32F4VGT6, которое обладает всем функциональным перечнем, описанным в подразделе 2.3. Помимо этого, на данной плате выполнена трассировка всех требующихся для работы микроконтроллерного устройства вспомогательных элементов. Плата STM32F4Discovery обладает следующим перечнем функциональных возможностей:

- микроконтроллером STM32F407VGT6;
- отладочным компонентом (часть платы) ST-LINK/V2, который позволяет производить отладку программ, отслеживать состояние переменных, потребление оперативной памяти и т.д.;
- разъём питания платы от USB;
- вывод питания, со значениями напряжения 3 В и 5 В;
- акселерометр с наличием трёх осей LIS302DL ST MEMS;
- микрофон, выполняющий аналогово-цифровую конвертацию MP45DT02 ST MEMS;
- цифро-аналоговый преобразователь CS43L22 с наличием встроенного усилителя класса D;
- светодиодами в количестве 8 шт.:
- LD1 (красный/зелёный) для осуществления диагностики подключения по USB;
- LD2 (красный) для 3,3 отображения питания 3 В;

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		81

- 4 светодиодами, которые могут быть использованы пользователями платы - LD3 (оранжевый), LD4 (зелёный), LD5 (красный) и LD6 (синий);
- 2 диодами, которые отвечают за наличие подключения по протоколу USB OTG - LD7 (зелёный) - наличие напряжения 5 В и LD8 (красный), отвечающий за превышение значения критического тока;
- 2 кнопками – пользовательской кнопкой и кнопкой для сброса;
- подключением по протоколу USB OTG FS с разъёмом микро-USB;
- выводами всех пинов микроконтроллерного устройства;
- поддержкой программного обеспечения STM32CubeMX и библиотек HAL и SPL. [46]

Плата обладает всеми требующимися функциональными возможностями и позволяет удобно производить отладку программы.

3.2 Макет эмуляции датчиков, используемых в автономной энергосистеме на основе ВЭУ

С целью проверки работоспособности программы применялась эмуляция изменяющихся данных, поступающих с датчиков энергетической системы. Плата STM32F4Discovery содержит выводы пинов микроконтроллерного устройства (в том числе каналов АЦП, вводов-выводов общего назначения, выводов I²C, а также таймера, генерирующего импульсы ШИ-модулятора), поэтому удобно рассматривать данные выводы для подключения макета эмуляции.

С целью осуществления имитации датчиков применялись переменные резисторы, которые подключались к выводам VDD (+3 вольт) и GND (общий провод, 0 вольт) отладочной платы STM32F4 Discovery. Средний вывод каждого из резисторов (величина их сопротивления относительно точек VDD и GND изменяется при изменении положения ручки переменного резистора) подсоединяется непосредственно к каналам АЦП.

Помимо этого, макет включает в себя 3 индикаторных светодиода:

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		82

- светодиод, эмулирующий включенное состояние ключа К1 (ключ, коммутирующий выход 48 В изображены на рисунке А.1 приложения А);
- светодиод, который загорается при выполнении электромеханического торможения;
- светодиод, подключенный к каналу, на котором производится ШИ-модуляция. Яркость данного светодиода будет изменяться в зависимости от коэффициента заполнения ШИ-модулятора.

В макете, помимо светодиодов и резисторов, предусмотрены две кнопки, служащие для изменения параметров алгоритма и коэффициента заполнения. Кнопки являются нормально разомкнутыми, а в замкнутом положении соединяют вывод VDD и соответствующий ввод общего назначения.

Электрическая схема макета эмуляции приводится на рисунке Д.1 приложения Д. Также в приложении Д представлена спецификация к схеме макета.

3.3 Проверка правильности работы алгоритма

С целью проверки правильности функционирования программы следует симитировать некоторые основные ситуации, которые способны возникнуть в процессе эксплуатации микроконтроллерного устройства. Перечень данных ситуаций приводится в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Имитируемые ситуации в энергетической системе

Возможная реальная ситуация	Имитация ситуации на макете	Действия микроконтроллера
1	2	3
Обрыв одного или нескольких датчиков	Один или несколько резисторов выставлены в состояние с сопротивлением $R = R_{MAX}$ (что соответствует крайнему их положению)	Отключить нагрузку, выставить $D = 0$, подать сигнал об аварийной остановке электромеханическим тормозом
Превышение одним из датчиков максимально допустимого значения	Один или несколько резисторов выставлены в состояние с сопротивлением $R = 0$	Отключить нагрузку, выставить $D = 0$, подать сигнал об аварийной остановке электромеханическим тормозом
Разряд аккумуляторных батарей	Резистор, имитирующий датчик напряжения аккумуляторных батарей, выставлен в состояние с некоторым сопротивлением R , меньшим, чем сопротивление, соответствующее минимальному порогу	Отключить нагрузку
Включение нагрузки после её отключения	Выставить: $U_{ACB} > U_{TH2}$; $U_1 > U_{ACB}$ (в соответствии с рисунком В.4)	Подключить нагрузку
Обрыв цепи	$U_1 > 0$; $D > 0$; $U_2 = 0$	Электромеханический тормоз
Недопустимая скорость вращения генератора	$U_1 > U_{1MAX}$	Электромеханический тормоз
Возможная реальная ситуация	Имитация ситуации на макете	Действия микроконтроллера
Ток заряда превышает сумму токов оптимального заряда АКБ, тока, поступающего на выход и погрешности	Выставить $I_{LD} > I_0 + 0,1 \cdot C + \Delta I$	При неаварийных ситуациях D уменьшается
Ток заряда находится в оптимальном диапазоне	Выставить $I_{LD} > I_0 + 0,1 \cdot C - \Delta I$ и $I_{LD} > I_0 + 0,1 \cdot C + \Delta I$	D остаётся неизменным
Ток заряда меньше требуемого	Выставить $I_{LD} < I_0 + 0,1 \cdot C - \Delta I$	D увеличивается
Аккумуляторные батареи заряжены	Резистор, имитирующий датчик напряжения аккумуляторных батарей, выставлен в состояние с некоторым сопротивлением R , большим, чем сопротивление, соответствующее максимальному порогу	Выставить $D = U_{ACB} / U_1$

Рассмотренные в таблице 3.1 возможные ситуации успешно симитированы с применением макета датчиков автономной энергетической системы. Микроконтроллерное устройство успешно выполнило ожидаемые от него действия в требуемых диапазонах, а также произвело информирование о текущих неполадках путём отображения соответствующей информации на дисплей.

Выводы по разделу 3

В разделе 3 была успешно выполнена проверка на работоспособность программного алгоритма контроля и управления автономной энергетической системой с помощью разработанного макета, отладочной платы STMF407 Discovery, а также информирующего дисплея.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		85

4 РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

4.1 Сетевое планирование проекта энергетической системы

Методы сетевого планирования и управления (СПУ) приобрели широкое распространение и успешно применяются для организации процесса оптимизации планирования и осуществления управления сложными разветвленными комплексами работ, которым требуется наличие большого числа участников процесса и ограниченных ресурсных затрат.

В соответствии с методикой расчёта, которая приводится в источнике [47], следует определить значения параметров сетевого графика. Перечень основных параметров, таких как события, сроки, исполнители приводятся в таблице 4.1.

Ожидаемая продолжительность каждого вида работ проекта энергосистемы вычисляется по специальной оценочной методике, основанной на двух параметрах: минимальной $t_{ij\text{мин}}$ и максимальной $t_{ij\text{макс}}$ оценках продолжительности. При этом значение минимальной оценки соответствует наиболее благоприятному варианту, а величина максимальной оценки соответствует наименее благоприятным условиям работы. Ожидаемая продолжительность работы определяется по формуле:

$$t_{ij\text{ож}} = 0,6 \cdot t_{ij\text{мин}} + 0,4 \cdot t_{ij\text{макс}}, \quad (4.1)$$

где $t_{ij\text{ож}}$ - ожидаемая продолжительность работы, дней;

$t_{ij\text{мин}}$ - минимальная возможная продолжительность работы, дней;

$t_{ij\text{макс}}$ - максимальная возможная продолжительность работы, дней.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		86

Ранний срок возникновения начального события в сетевом графике проекта принимается равным нулю. Ранний срок совершения некоторого данного промежуточного события вычисляется с помощью сравнения сумм, которые составляются из раннего срока выполнения определенного события, непосредственно предшествующего некоторому данному, и продолжительности работы. Затем выбирается наибольшее значение сравниваемых сумм, которое и будет представлять собой ранний срок совершения события.

Таблица 4.1 - Перечень работ сетевого графика проекта

Наименование работы	Код работы	Исполнители, ч.		Продолжительность, дн.		
		Главный инженер	Инженер	мин.	макс.	ожд.
1	2	3	4	5	6	7
Получение и проведение анализа задания на разработку	0,1	1	-	1	3	2
Выбор литературы, осуществление поиска информации в Интернете	1,2	-	1	2	4	3
Выполнение анализа уже существующих решений	2,3	-	1	1	2	1
Синтез структурной схемы	3,4	1	1	2	4	3
Синтез алгоритма работы микроконтроллерного устройства	4,5	1	1	5	7	6
Оценка требований, которые предъявляются к микроконтроллерному устройству и его дальнейший выбор	5,6	1	-	1	2	1
Ознакомление с документацией к микроконтроллеру	6,7	1	1	4	6	5
Изучение рекомендаций компании-производителя микроконтроллерного устройства по выбору используемого программного обеспечения	6,8	-	1	1	1	1
Выбор применяемой периферии микроконтроллерного устройства	7,9	-	1	1	2	1

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7
Выбор используемого программного обеспечения	8,9	1	-	1	1	1
Конфигурирование периферии микроконтроллерного устройства	9,11	1	1	3	5	4
Обзор математического аппарата	9,10	1	1	4	7	5
Осуществление выбор способов фильтрации или осреднения	10,11	1	1	1	1	1
Разработка программного кода	11,13	1	1	10	15	12
Проектирование макета, осуществление выбора его компонентов	11,12	1	1	2	3	2
Создание макета с целью проверки работоспособности программы	12,13	-	1	2	4	3
Расчёт экономической части проекта	13,14	-	1	1	2	1
Анализ потенциально опасных факторов и условий, разработка мероприятий по безопасности жизнедеятельности	14,15	-	1	1	2	1
Разработка необходимой документации	15,16	1	1	3	4	3
Сдача готового проекта	16,17	1	-	1	1	1

Рассчитанный данным методом ранний срок свершения последнего события всего сетевого графика проекта энергосистемы принимается в качестве его же позднего срока выполнения. Чтобы найти поздний срок свершения того или иного события, требуется просмотреть сетевой график в направлении от конца к началу. Поздний срок свершения рассматриваемого события приравнивается к минимуму из следующих разностей для примыкающих, то есть которые стоят слева от события, работ: между поздним сроком свершения события, следующего за текущим, и продолжительность работы, соединяющей соответствующее событие с данным событием. Резерв времени равняется больше нуля у событий, поздний срок выполнения которых является больше раннего, он равняется разности между ними. В том случае, если эти сроки равны, то событие не обладает резервным временем и находится на критическом пути сетевого графика.

Результаты расчётов сроков свершения событий сводятся в таблицу 4.2. Сетевой график проекта приводится в приложении Е на рисунке Е.1. Жирным начертанием линии на графике изображается критический путь.

Таблица 4.2 - Расчёты сроков сетевого графика проекта

№ события	Сроки свершения события, дн		Резерв времени события, дней
	ранний	поздний	
1	2	3	4
0	0	2	0
1	2	2	0
2	5	7	0
3	6	13	8
4	9	9	0
5	15	15	0
6	16	16	0
7	21	21	0
8	17	21	4
9	22	22	0
10	27	27	0
11	28	28	0
12	30	37	7
13	40	40	0
14	41	41	0
15	42	42	0
16	45	45	0
17	46	46	0

Ранний срок начала работы равняется раннему сроку свершения начального события данного вида работ. Поздний срок завершения работы можно вычислить путём вычитания из позднего срока свершения последнего события работы ожидаемую длительность работы.

Ранний срок окончания вида работ определяется как сумма его длительности и раннего срока свершения начального события данного типа работ. Поздний срок свершения работы должен совпадать с поздним сроком окончания её последнего события.

Полный резерв времени вида работ можно вычислить способом вычитания позднего срока свершения его начального события из его ожидаемой продолжительности.

Частный резерв времени работы первого рода равняется разности поздних сроков свершения её начального и конечного событий без учёта её ожидаемой продолжительности. Частный резерв времени работы второго рода приравнивается к разности ранних сроков свершения её начального и конечного событий без учёта её ожидаемой продолжительности.

Свободный резерв времени работы рассчитывается путём вычитания из раннего срока осуществления её последнего события позднего срока свершения её начального события и её ожидаемой продолжительности. Свободному резерву времени допускается быть меньше нуля.

Для видов работ, которые располагаются на критическом пути, резервы времени равняются нулю, вследствие чего их коэффициент напряженности равняется единице. При расположении работы не на критическом пути её резервы времени не равняются нулю, и значение коэффициента напряжённости такой работы составляет меньше единицы. Величина коэффициента рассчитывается как отношение суммы длительностей отрезков самого продолжительного пути, который проходит через некоторый вид работы, не совпадающих с критическим путём, к сумме продолжительностей отрезков критического пути, которые не совпадают с самым большим по продолжительности путём, проходящим через рассматриваемый вид работ.

Вычисленные значения параметров работ сводятся в таблицу 4.3.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		90

Таблица 4.3 - Значения параметров сетевого графика проекта

Код работы	Ожидаемая продолжительность	Сроки начала		Сроки окончания		Резервы времени				Коэффициент напряжённости
		ранний	поздний	ранний	поздний	полный	частный 1 рода	частный 2 рода	свободный	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,1	2	0	0	2	2	0	0	0	0	1
1,2	3	2	2	5	5	0	0	0	0	1
2,3	1	5	5	6	6	0	0	0	0	1
3,4	3	6	6	9	9	0	0	0	0	1
4,5	6	9	9	15	15	0	0	0	0	1
5,6	1	15	15	16	16	0	0	0	0	1
6,7	5	16	16	21	21	0	0	0	0	1
6,8	1	16	20	17	21	4	4	0	0	0,33
7,9	1	21	21	22	22	0	0	0	0	1
8,9	1	21	21	18	22	4	0	4	0	0,33
9,11	4	22	24	26	28	2	2	2	2	0,67
9,10	5	22	22	27	27	0	0	0	0	1
10,11	1	27	27	28	28	0	0	0	0	1
11,13	12	28	28	40	40	0	0	0	0	1
11,12	2	28	35	30	37	7	7	0	0	0,42
12,13	3	30	37	33	40	7	0	7	0	0,42
13,14	1	40	40	41	41	0	0	0	0	1
14,15	1	41	41	42	42	0	0	0	0	1
15,16	3	42	42	45	45	0	0	0	0	1
16,17	1	45	45	46	46	0	0	0	0	1

Количество событий n_c (включая исходное) составляет 18, количество работ n_p равняется 21.

Критический путь, который проходит через события и виды работ, не обладающих резервами времени, обладает продолжительностью, равной 46 дням.

Коэффициент сложности K_c , который равен отношению количества работ к количеству событий, определяется по формуле:

$$K_c = \frac{21}{18} = 1,17 \quad (4.2)$$

4.2 Техничко-экономические расчёты проекта

Расчёт технико-экономических показателей проекта производится по методике, которая приводится в источнике [48].

По причине того, что в данной выпускной квалификационной работе не применялось специальное оборудование для проведения научных и экспериментальных работ, не организовывались производственные командировки, не возникло потребности в услугах контрагентских организаций, соответствующие им статьи расходов не включались в расчёт перечня предшествующих производственных затрат. Расходы по статьям «материалы за вычетом отходов» и «покупные изделия и полуфабрикаты» рассчитываются прямым счётом, основываясь на рыночных ценах на данные виды материалов и изделий. Расходы на материалы и покупные изделия приводятся в таблице 4.4. Принимается следующий состав рабочей группы: 1 главный инженер, 1 инженер. Объём денежных выплат исполнителям работ и суммарная трудоёмкость выполняемых ими видов работ приводятся в таблице 4.5.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		92

Таблица 4.4 - Ведомость покупных изделий и материалов проекта

Наименование, тип, марка	Используемое количество, шт. (м, кг)	Цена одного изделия, руб.	Стоимость изделий в устройстве, руб.
1	2	3	4
Сборочные единицы			
Плата STM32F4Discovery	1	1600	1600
ЖК-дисплей	1	300	580
Расширитель портов	1	80	80
Соединительные провода	25	2	50
Компоненты макета			
Конденсаторы			
22нК-220 нФ	2	2	4
Резисторы			
СП4-2М-10 кОм	6	70	420
МЛТ-2-510 Ом	3	10	30
МЛТ-2-200 Ом	2	10	20
С1-4-0,5-270 кОм	2	10	20
Диоды			
АЛ112А(Г)	2	15	30
АЛ336В	1	15	15
Кнопки			
МТЗ	2	20	40
Корпус			
Короб из ПВХ	1	15	15
Колпачки для резисторов	6	4	24
Расходные материалы			
Провод монтажный НВМ 0,35 мм ГОСТ 20171-63	1	20	20
Припой ПОС-61 ГОСТ 21931-76	0,05	200	10
Канифоль (светлая)	1	100	100
Клей «Супер Момент»	1	50	50
Изолента синяя	1	20	20
Итого			3168

Таблица 4.5 – Затраты оплаты труда на проектирование, разработку программы и конфигурирование программного обеспечения

Исполнители	Оклад, руб./мес	Трудоёмкость, дней	Основная зарплата, руб.	Отчисления, руб.
Главный инженер	50000	39	88636	26591
Инженер	30000	43	58636	17591
Итого	80000	82	147273	44182

В соответствии с действующим законодательством РФ, размер отчислений на обязательное медицинское страхование равняется 5,1%; отчисления в пенсионный фонд составляют 22%; в фонд социального страхования они принимаются равными 2,9%. Совокупно размер отчислений составляет 30% от основной заработной платы сотрудника.

Статья расходов категории «прочие прямые расходы» содержит в себе расходы, которые связаны с копированием технической документации, затраты на потреблённую электрическую энергию и др. Округлённо данная статья расходов принимается равной 3% от суммы затрат по предыдущим статьям.

Результаты расчёта сметы затрат на проектирование, разработку программы и конфигурирование программного обеспечения отображаются в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Смета затрат на проектирование, разработку программы и конфигурирование программного обеспечения

Наименование статьи затрат	Сумма, руб.
1. Затраты на покупные изделия и материалы	3168
2. Основная заработная плата	147273
3. Отчисления	44182
6. Прочие прямые расходы	5839
Итого	200462

С целью определения величины экономической эффективности, которая получается при использовании ветроэнергетической установки, требуется найти эмпирическую повторяемость скоростей потоков ветра, свойственную для условий

города Челябинска [49]. Распределение вероятностей скоростей потоков ветра по месяцам года отображается в таблице 4.7.

Количество удельной вырабатываемой потоками ветра энергии определяется по формуле:

$$W_{уд} = 3,6 \cdot \beta \cdot T \cdot (\sum_{V_{min}}^{V_p} V_i^3 \cdot t_{V_i} + V_p^3 \cdot \sum_{V_p}^{V_{max}} t_{V_i}), \quad (4.3)$$

где $W_{уд}$ - удельная вырабатываемая энергия, Дж/м²;

β - постоянный коэффициент, который определяет конструктивные элементы ветроэнергетической установки, принимается равным 0,0002 согласно источнику[49];

T - количество часов в месяце, ч;

V_i - средняя скорость по градациям для i -го месяца, м/с;

V_p - рабочая скорость потока ветра, м/с;

t_{V_i} - относительная повторяемость скорости потока ветра по градациям.

Таблица 4.7 - Эмпирическая повторяемость скоростей потоков ветра в условиях города Челябинск

1	Градация скоростей ветра, м/с								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Месяц	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	Более 16
Январь	0,46	0,25	0,15	0,08	0,04	0,01	0,005	0,005	0,46
Февраль	0,48	0,26	0,15	0,06	0,03	0,01	0,005	0,004	0,48
Март	0,45	0,29	0,15	0,06	0,04	0,01	0	0	0,45
Апрель	0,35	0,29	0,19	0,08	0,06	0,02	0,01	0	0,35
Май	0,31	0,32	0,19	0,1	0,05	0,02	0,01	0	0,31
Июнь	0,35	0,34	0,19	0,08	0,04	0	0	0	0,35
Июль	0,42	0,34	0,16	0,05	0,03	0	0	0	0,42
Август	0,43	0,33	0,17	0,05	0,02	0	0	0	0,43

Продолжение таблицы 4.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сентябрь	0,41	0,29	0,17	0,07	0,04	0,02	0	0	0,41
Октябрь	0,35	0,3	0,18	0,09	0,05	0,02	0,01	0	0,35
Ноябрь	0,39	0,29	0,17	0,08	0,04	0,02	0,01	0	0,39
Декабрь	0,51	0,25	0,13	0,06	0,03	0,01	0,01	0	0,51
Год	0,41	0,3	0,16	0,072	0,04	0,012	0,005	0,001	0,41

Ометаемая площадь ветряка принимается равной 15 м², при этом диаметр ротора составляет 3,4 метра, а высота - 4,4 метра. В таком случае полный объём электрической энергии, которая генерируется ветроэнергетической установкой:

$$W_{ВЭУi} = W_{удi} \cdot S, \quad (4.4)$$

где $W_{ВЭУi}$ - генерация электрической энергии ветровой энергоустановкой в данном месяце, Дж;

S - ометаемая площадь ветроэнергетической установки, м²;

$W_{удi}$ - удельная вырабатываемая энергия, определяемая по формуле (4.3), Дж.

Определяемые по формулам (4.3) и (4.4) значения полной энергии, которую генерирует ветроэнергетическая установка, приводятся в таблице 4.8.

Таблица 4.8 - Выработка ветровой энергоустановки в различные месяцы и за год

Месяц	$W_{ВЭУ}$, МДж
Январь	1677,91
Февраль	1338,41
Март	1468,57
Апрель	2107,59
Май	2201,14
Июнь	1425,51
Июль	1173,36
Август	1096,17
Сентябрь	1709,02
Октябрь	2119,42
Ноябрь	1889,04
Декабрь	1447,49
За год	19653,64

Годовая выработка энергии в киловатт-часах составляет:

$$W_{ВЭУ} = 5459 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Если учитывать, что стоимость одного киловатт-часа электроэнергии составляет 3,52 рублей [50], то прибыль E от выработки ветроэнергетической установки будет равняться:

$$E = 5459 \cdot 3,52 = 15941 \text{ рублей в год.}$$

Исходя из расчётов срок окупаемости реализации проекта в случае осуществления выпуска 10 установок:

$$P = \frac{C}{E \cdot n}, \quad (4.5)$$

где E - годовая прибыль от использования ветровой энергоустановки;

n - планируемое количество производимых энергетических установок;

C - затраты на реализацию проекта.

$$n = \frac{200462}{15941 \cdot 10} = 1,26 \text{ лет} = 15,1 \text{ месяцев.}$$

Выводы по разделу 4

В организационной части раздела 4 был рассмотрен перечень основных мероприятий, которые требуются для осуществления проекта, длительность работ, необходимых для его реализации, произведён выбор количества сотрудников, ответственных за разработку и осуществления проекта. На основе полученных

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		97

результатов расчётов построен сетевой график, а также произведён расчёт резервов и значений коэффициентов напряжённости.

В технико-экономической части раздела 4 вычислены объёмы затрат на осуществление проекта энергосистемы, выполнен расчёт уровня экономической эффективности и необходимый период окупаемости проекта ветроэнергетической системы с учетом значений характеристик распределения потоков ветра в условиях города Челябинска.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		98

5 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Ветроэнергетическая установка является источником электрической энергии. Генерируемое ветровой энергоустановкой малой мощности напряжение способно достигать нескольких сотен вольт. Данный уровень напряжения является потенциально опасным для здоровья и жизни человека. По этой причине сотрудникам требуется применять различные средства защиты человека от воздействия опасного напряжения. В качестве таких средств выделяют:

- использование изоляции проводников электрического тока;
- применение защитных заземляющих устройств;
- использование систем защитных нулевых проводов (нейтралей);
- и прочие средства защиты от воздействия опасного напряжения.

Так как ветроэнергетические установки размещаются на некоторой высоте над поверхностью земли, существует опасность поражения энергоустановки электрическим током. В таком случае существует вероятность поражения человека электрическим током, по этой причине вблизи ветровой установки располагают устройство громоотвода.

Помимо описанных выше опасных факторов, также может возникнуть опасность возгорания частей ветроэнергетической установки, которые подвержены воздействию электрического тока, в том числе в случае попадания молнии. По этой причине в максимальной близости от потенциальных очагов возгорания располагаются различные средства защиты от пожаров.

Согласно ГОСТ Р51991-2002 [51], к ветроэнергетическим установкам предъявляются следующие требования безопасности:

- защитные меры по предотвращению воздействия на человека электрического напряжения и тока;
- обеспечение защиты от возможного поражения частями оборудования, подверженных вращательному движению;

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		99

– применяемые системы заземляющих устройств и виды электрических проводников определяются в соответствии с ГОСТ 30331.2. Необходимые требования к защитным проводникам и устройствам заземления регулируются в ГОСТ Р 50571.10;

– открытые проводящие электрический ток части электрооборудования, которые способны оказаться под напряжением, величина которого опасна для здоровья и жизни человека, по причине повреждения изоляции, обязаны электрически соединяться с корпусом электрического оборудования;

– электрическое оборудование должно иметь зажимы заземления, посредством которых возможно осуществить подключение нулевого рабочего и нулевого защитного проводников;

– осуществление изоляции токоведущих частей электрического оборудования ветроэнергетической установки, а также электрических цепей с номинальным значением напряжения 230 и 400 В должно обеспечивать способность выдерживать без разрушения в течение одной минуты переменное синусоидальное напряжение соответственно 1500 и 1800 В частотой 50 Гц;

– величина сопротивления электрической изоляции отдельных разобращенных силовых цепей с напряжением 230 и 400 В между собой и по отношению к корпусу в холодном состоянии должно составлять не менее 20 МОм, в горячем состоянии — не менее 3 МОм;

– необходимые требования пожарной безопасности, которые предъявляются к ветроэнергетической установке, регламентируются ГОСТ 12.1.004;

– в ветровой энергоустановке должно предусматриваться конструктивное исполнение защиты от воздействия молний путем применения молниеотводов, которые обеспечивают прохождение разряда молнии в обход конструктивно важным элементам ВЭУ - главного вала ветрового агрегата и подшипников лопастей;

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		100

– в областях, необходимых для обеспечения персоналом ветроэнергетической установки своих служебных обязанностей, где имеется вероятность потери равновесного положения, в обязательном порядке требуется наличие ограждающих конструкций. Проведение работ на высоте осуществляется только с использованием исправных устройств защиты от падения (ремней безопасности);

– в ветровых энергоустановках требуется применение специальных устройств, обеспечивающих препятствие к возможному проникновению посторонних людей на территорию башни. Все виды оборудования и устройства необходимо снабжать информационными плакатами и вывесками;

– персонал, осуществляющий выполнение работ по обслуживанию и эксплуатации ветроэнергетических установок, обязан применять соответствующие средства индивидуальной защиты, специальную одежду и обувь, а также защитные каски. Для обслуживающего персонала, исполняющего работы на высоте, обязательным требованием является прохождение специальной программы обучения.

– в случае производства верхолазных работ над водной поверхностью требуется предусматривать наличие плавучего спасательные средства в непосредственной близости от области проведения работ.

К общим требованиям, согласно ГОСТ Р 54418.1-2012 [52], для осуществления безопасности при эксплуатации, проведении осмотров и технического обслуживания ветроэнергетических установок относятся:

– управление процессом безопасной эксплуатации ветроэнергетической установки обслуживающим персоналом;

– обеспечение возможности автоматического возврата к нормальной эксплуатации ветровой энергетической установки при возникновении несущественных внешних неполадок, которые являются некритическими по отношению к уровню безопасности эксплуатации ветровой энергоустановки;

– выполнение ограничения подвижными или съёмными ограждениями, предусмотренными с целью защиты персонала от случайно возникшего контакта с

подвижными конструкционными элементами, которые часто подлежат внешнему осмотру в процессе эксплуатации. Ограждения подвижных и вращающихся элементов конструкции, осмотр которых производится редко, должны быть надежно закреплены;

– ограждения, а также защитные кожухи, которые осуществляют закрытие движущихся частей трансмиссий и электрооборудования, должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.003.

Ограждения также должны:

– обладать достаточной прочностью;

– быть не доступными для проникновения посторонних;

– по возможности позволять осуществление технического обслуживания и ремонта без выполнения демонтажа.

– обеспечивать возможность применения устройств, позволяющих подключить диагностическое оборудование.

Для осуществления безопасных условий труда для обслуживающего и ремонтного персонала в конструкции ветровой энергоустановки должны предусматриваться:

– наличие безопасных способов доступа, проходов и оснащение рабочих мест с целью осуществления осмотра и планового технического обслуживания элементов ветроэнергетической установки;

– обеспечение персонала средствами защиты от возникновения вероятностного контакта с элементами установки и деталей, подверженных вращению или поступательному движению;

– обеспечение исправного состояния рекомендованных устройств безопасности при выполнении верхолазных работ и работ на высоте, способствующего безопасному их функционированию в процессе эксплуатации;

- наличие блокировочных устройств для элементов ветровой энергоустановки, подверженных вращательному движению, а также устройства для осуществления безопасного процесса разблокировки,
- знаки безопасности и сигнализирующие знаки в соответствии с ГОСТ Р 12.4.026.
- элементы для осуществления защитного заземления металлических нетоковедущих частей изделия, которые могут оказаться под напряжением (при нарушении изоляции режима работы изделия);
- соответствующие устройства по обеспечению защиты от пожарной опасности;
- обеспечение обязательного процесса эвакуации из гондолы в случае возникновения аварийной ситуации;
- обслуживающий и ремонтный персонал, который осуществляет свои функции в закрытых и ограниченных пространствах (ступица ветрового колеса, лопасть и т.п.) должен снабжаться защитными средствами, которые обеспечивают гарантию информирования лиц, осуществляющих страховку, в кратчайшие сроки в случае возникновения аварийной ситуации, и скорейшего начала процесса проведения спасательных работ.

Выводы по разделу 5

В разделе 5 рассмотрены основные требования безопасности к ветроэнергетическим установкам, а также к осуществлению перечня работ по обслуживанию ветровой энергетической установки. Данные требования регламентируются ГОСТ, что подразумевает обязательное их соблюдение.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
						103
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы успешно были выполнены поставленные задачи, в том числе:

- были рассмотрены основные разделы теории систем управления ветроэнергетическими установками;

- осуществлено составление структурной схемы для системы;

- произведен выбор необходимого программного обеспечения;

- в соответствии с разработанной структурной схемой энергосистемы с помощью выбранных программных продуктов произведена настройка конфигурации микроконтроллерного устройства;

- на основе существующих алгоритмов ветроэнергетических установок был разработан алгоритм, учитывающий её автономность;

- был разработан программный код на языке программирования высокого уровня Rust, основанный на необходимых для функционирования системы алгоритмах управления;

- было произведено моделирование экспериментальной проверки безошибочной работоспособности алгоритма управления при различных вероятностно возникающих ситуациях;

- в организационно-экономической части выпускной квалификационной работы были произведены расчёт сетевого графика при осуществлении написания программного кода, а также осуществлен технико-экономический расчёт общей стоимости работ, выполнен расчёт срока окупаемости данного проекта при выработке электрической энергии ветроэнергетической установкой в реальных условиях Челябинской области;

- в разделе «Безопасность жизнедеятельности» произведен обзор основных мероприятий, которые направлены на осуществление безопасных условий при эксплуатации ветроэнергетической установки.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		104

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Сайт «World Wind Energy Association Library Statistics». - <https://library.wwindea.org/global-statistics/>

2 ГОСТ Р 51990-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация. - М.: Издательство стандартов, 2003. - 8 с.

3 ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. - М.: Издательство стандартов, 1999. - 12 с.

4 Соломин, Е.В. Алгоритмы автоматической зарядки LiFePO₄ аккумуляторов / Е.В. Соломин, Д.В. Топольский, И.Г. Топольская. Челябинск, 2015. - 13 с.

5 Удалов, С. Н. Возобновляемые источники энергии : учебное пособие / С.Н. Удалов. - 3-е изд., перераб. и доп. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. - 459 с. + цв. вкл. - (Серия «Учебники НГТУ»).

6 Расчет параметров накопителей энергии для автономных энергокомплексов: методические указания / сост.: И.М. Кирпичникова, Е.В.Соломин. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. - 20 с.

7 Чекстер, О. Свинцово-кислотные аккумуляторы для стационарного оборудования связи / О. Чекстер, И. Джосан // Технологии и средства связи. - 2004. - №2 - с. 12.

8 Разработка научно-технических решений компонентов мобильных зарядных устройств для аккумуляторных батарей гибридного и электрического приводов городского грузового и пассажирского автомобильного транспорта по теме: «теоретические исследования» (промежуточный). Этап второй. // Отчет о прикладных научных исследованиях и экспериментальных разработках. Челябинск, 2015. - 153 с.

9 Соломин, Е.В. Алгоритмы автоматической зарядки LiFePO₄ аккумуляторов / Е.В. Соломин, Д.В. Топольский, И.Г. Топольская. Челябинск, 2015. - 13 с.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		105

10 Jeong, R.G. An Improved Maximum Power Point Tracking Method for Wind Power Systems / Hae Gwang Juong, Ru Hak Seung, Kyo Beum Leie // Energies. - 2015. - № 6. - P. 760.

11 Максимальная точка мощности. - https://ru.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_point_tracking.

12 Патент 2563877 Российская Федерация, МПК7 H02P9/04, F03D704. Способ торможения ветроколеса ветроэнергетической установки и устройство для его реализации / С.М. Есаков, А.Ю. Велико-Иваненко, М.С. Есаков - 5 с.

13 Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов; под ред. Л. А. Жукова. — М.: Энергия, 1989. - 465 с.

14 Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 369 с.

15 Твайдел, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж.Твайделл, А.Уэйр / Пер. с англ. под ред. Коробкова В.А. - М.: Энергоатомиздат, 2003. - С. 185-263.

16 Solomin, E. V. Iterative Approach in Design and Development of Vertical Axis Wind Turbines / Kirpichnikova I. M., Martyanov A. S. // Applied Mechanics and Materials. Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering Collection of selected, peer reviewed papers from the International Conference for Young Scientists “ELECTRICAL ENGINEERING. ELECTROTECHNOLOGY. ENERGY”, June 9-12. — 2015. — С. 92—95.

17 Лятхер, В.М. Развитие ветроэнергетики / В.М. Лятхер // Малая энергетика. - 2016. - №1-2 (4-5). - С. 28-48.

18 Ветроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография /Г.В. Никитенко, Е.В. Коноплев Ставропольский государственный аграрный университет. - Ставрополь АГРУС, 2012 - С. 152.

19 Щербаков, И. Ф. Ветроэнергетическая установка с вертикальным ротором и поворотными лопастями // Нетрадиционная энергетика и технология. Материалы международной конференции. Ч. 1. Владивосток: ДВО РАН, 1996.-С. 68.

20 Дмитриева, Г.А. Анализ работы неуправляемой ВЭУ в автономной системе // Электричество, 1998. № 6. — С. 16-23.

21 Strickland, M.D. Comprehensive Guide To Studying Wind Energy/Wildlife Interactions / M.D.Strickland // National Wind Coordinating Collaborative. - 2014. - p.107-126.

22 Torres, E. Wind Energy. A Guide for small to medium sized enterprises / E.Torres, M.Garcia-Sanz // TWT1650, Wind Energy 8. - 2013. - p.108-116.

23 Torres, F. Experimental results of the variable speed, direct drive multipole synchronous wind turbine/ E.Torres, M.Garcia-Sanz // TWT1650, Wind Energy 12. - 2015. - p.106-117.

24. Novak, P. Modelling, identification and control of a variable speed HAWT/ P. Novak, T. Ekelund // In Proceedings of the European Wind Energy Conference - EWEC '94. - 1994. - p. 441-446.

25 Jianbou, Z. Switch Control for Variable Speed Small Wind Turbines/ Jianbou Zhang, Chung, Che Zhen, Xiaofan Fu: DRPT2009, 7-10 April, 2017.

26 Филаретов, В. Ф. Система управления генератором ветроэнергетической установки // Сб. трудов Дальневосточного отделения Российской инженерной академии. Вып. 3. — Владивосток: ДВГТУ, 2000. С. 28-41.

27 Datta, R. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system/ R. Datta, V.T. Ranganathan // IEEE Transactions on Energy Conversion.- 2017. - № 19(1). - p. 173-178.

28 Филаретов, В. Ф. Разработка системы автоматической стабилизации параметров выходного напряжения автономной ветроэнергетической установки // Электричество. 2011. — № 8.-С. 38-43.

29 Патент 2347104 Российская Федерация, МПК F03D 3/06 (2006.1). Ротор ветряной установки с вертикальной осью вращения / Ю.В.Грахов, Е.В.Соломин и др. - № 2006117014/06; заявл. 12.05.2006; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. - 12с.

30 Jianzhong, Z. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines/ Jianzhong Zhang, Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu: DRPT2008, 6-9 April, 2018.

31 Панкратов, В.М. Регулирующее устройство для вертикальных ветродвигателей с поворотными лопастями. Авт. свид. СССР, 1938. Оpubл. 31.10.40.

32 Зубова, Н. В. Методы оптимального управления ветроэнергетической установкой по критерию энергетической эффективности / Н.В. Зубова, С. Н. Удалов, В. З. Манусов // Материалы 5 Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». - Томск: Изд-во ТПУ, 17-18 мая 2012 г., с.16-19.

33 Вольдек, А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. - 3-е изд., перераб. / А.И. Вольдек. - Л.: Энергия, 1978. - 842 с.

34 Гельман, М.В. Преобразовательная техника. Учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. - 118 с.

35 Гальваническая развязка. - https://ru.wikipedia.org/wiki/Гальваническая_развязка.

36 Документация для микроконтроллеров STM32F405xx и STM32F407xx. - <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>.

37 Компилятор. - <https://ru.wikipedia.org/wiki/Компилятор>.

38 Интегрированная среда разработки. - https://ru.wikipedia.org/wiki/Интегрированная_среда_разработки.

39 Сайт с документацией для IAR Embedded Workbench. - <https://www.iar.com/iar-embedded-workbench/>

40 Отладчик. - <https://ru.wikipedia.org/wiki/Отладчик>.

41 Компоновщик. - <https://ru.wikipedia.org/wiki/Компоновщик>.

42 Devillard, N. Fast median search: an ANSI C implementation» / Nicolas Devillard. - 2018, July.

43 Бхаргава, А. Грокаем алгоритмы / А. Бхаргава - М: Питер, 2019. - 78 с.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		108

44 Numerical Recipes In Rust: The Art Of Scientific Computing. 2-nd edition / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P Flannery. - Cambridge: Cambridge University Press, 2012. - 636 p.

45 Голов, А.А. Алфавитно-цифровые индицирующие ЖК-модули на основе контроллера HD44780. Руководство по применению. - www.cqham.ru%2Fforum%2Fattachment.php%3Fattachmentid%3D35975%26d%3D1244553196&usg=AFQjCNG8F7xUgo1cZEMLVsUIB4eXVtEzKw&sig2=caQA_VYi-EOEYvmev47QBQ&bvm=bv.119408272,d.bGs&cad=rja.

46 Документация к плате STM32F4 Discovery. - http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00037955.pdf.

47 Сетевые методы планирования и управления: Методические указания к курсовому проекту для студентов приборостроительного факультета / сост.: В.С. Зинкевич, Л.А. Баев, Н.П. Мешковой. - Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2013. - 23 с.

48 Организационно-экономический раздел дипломного проекта конструкторского направления: Учеб. пособие для студентов приборостроительного факультета / сост.: Мешковой Н.П., Закиров Р.Ш., Зинкевич В.С., Попов Г.С.; Под ред. Н.П. Мешкового. - Челябинск: ЧГТУ, 2010. - 63 с.

49 Кирпичникова, И.М. Расчет и выбор гелио- и ветроэнергетической установки для горячего водоснабжения объектов Челябинской области: методические указания к контрольной работе /сост. И.М. Кирпичникова, Л.А. Саплин, Е.В.Соломин. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. - 30с.

50 Постановление Государственного Комитета «Единый тарифный орган Челябинской области» от 14 ноября 2018 года № 1599а/18 «О предельных уровнях тарифов на электрическую энергию (мощность) на 2019 год».

51 ГОСТ Р 51991-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования. - М.: Издательство стандартов, 2003. - 12 с.

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		109

52 ГОСТ Р 54418.1-2012. Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Технические требования. - М.: Стандартинформ, 2013. - 191 с.

53 Сайт с документацией языка программирования Rust. - <https://www.rust-lang.org/>

54 Язык программирования Rust. - [https://ru.wikipedia.org/wiki/Rust_\(язык_программирования\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Rust_(язык_программирования))

55 The Rust Programming Language. - <https://doc.rust-lang.org/book/>

					13.04.02.2020.236.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подп.	Дата		110