

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт **Энергетический (ЭНИН)**

Направление подготовки **13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника**

Кафедра **Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Комбинированные автономные системы электроснабжения с использованием ВИЭ

УДК 621.31.031:621.311.26

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5E	Савкин Кирилл Дмитриевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Обухов С.Г.	д.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Попова С.Н.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Бородин Ю.В.	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроснабжение промышленных предприятий	Сурков М.А.	к.т.н., доцент		

Томск – 2017 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа _____ 86 _____ с., _____ 63 _____ рис., _____ 9 _____ табл.,
_____ 20 _____ источников, _____ 3 _____ прил.

Ключевые слова: моделирование автономных систем электроснабжения, электроснабжение децентрализованных потребителей, буферные накопители энергии, возобновляемые источники энергии, алгоритм оптимизации выбора оборудования.

Объектом исследования является (ются) децентрализованные потребители.

Цель работы – повышение эффективности использования ресурса дизель-генераторов и, как, следствие снижение топливных затрат.

В процессе исследования проводились разработка и реализация модели системы электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии; разработка и реализация алгоритма оптимизации выбора оборудования.

В результате исследования был разработан инструмент моделирования _____ систем электроснабжения децентрализованных потребителей.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: моделирование системы электроснабжения выполнено с использованием шины постоянного тока как узла сопряжения элементов схемы; для упрощения конструкции модели, используется только постоянный ток; алгоритм оптимизации выбора оборудования основан на минимизации целевой функции затрат, критерием оптимальности является минимум затрат на установку и эксплуатацию оборудования.

Степень внедрения: проектные институты.

Область применения: децентрализованные потребители, находящиеся в любом регионе России.

Экономическая эффективность/значимость работы: данная работа имеет высокую значимость теоретического и практического уровня.

В будущем планируется усовершенствование модели и программы оптимизации.

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Анализ комбинированных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии	6
1.1 Анализ схем построения гибридных электростанций	6
1.2 Анализ проблемы оптимизации выбора оборудования	10
Выводы по главе 1	11
Глава 2. Разработка модели гибридной системы электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии	13
2.1 Обоснование и описание основных параметров модели	13
2.2 Модели компонентов	15
2.2.1 Модель источников энергии.....	15
2.2.2 Модель полезной нагрузки	19
2.2.3 Модель балластной нагрузки	21
2.2.4 Модель блоков аккумуляторных батарей	22
2.2.5 Обработка метеорологических сведений	27
2.2.6 Апробация разработанной модели.....	38
Выводы по главе 2	41
Глава 3. Разработка и реализация алгоритма оптимизации выбора оборудования	42
3.1 Общее описание алгоритма	42
3.2 Ввод исходных данных	44
3.3 Расчет генерации ВИЭ	47
3.4 Расчет удельных затрат	49
3.5 Формирование целевой функции	50
3.6 Определение количества аккумулируемой энергии	53
3.7 Структурирование и вывод результатов	55
Выводы по главе 3	56
Глава 4. Выбор оборудования гибридной системы электроснабжения для конкретного заданного объекта	57
Выводы по главе 4	61
Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	62
5.1 Изучение конкурирующих продуктов	62
5.2 Структура работ в рамках проведения научного исследования	63
5.4 Составление сметы затрат на проведение научного исследования	69
5.5 Оценка важности рисков.....	72
Выводы по главе 5	73
Заключение.....	74
Список использованной литературы.....	76

Введение

Помимо электроэнергетики в классическом понимании, существует так называемая малая энергетика – автономные маломощные электростанции. По данным Минэнерго России из 50 тыс. электростанций, находящихся на территории РФ 49 тыс. относятся к малым. Их суммарная установленная мощность равна 17 ГВт, а годовая выработка электроэнергии составляет 50 млрд. кВтч. [1]. Основным генерирующим агрегатом является дизель-генератор (ДГ). Такой способ производства электроэнергии применяется в удаленных районах, где отсутствует возможность подключения потребителей к магистральной системе электроснабжения (СЭС). Как правило, мощность удаленных потребителей невелика и достигает порядка 100 кВт.

Разумеется, подобные автономные системы имеют свои достоинства и недостатки. К достоинствам, пожалуй, можно отнести только мобильность таких электростанций и автономность, а недостатков выявлено гораздо больше. Это необходимость регулярного обслуживания, дороговизна самого топлива и его доставки, сравнительно небольшой срок службы при непрерывной работе, вредные выбросы в окружающую среду. Несмотря на все эти негативные стороны, дизельные установки все же очень часто применяются, так как полноценной менее затратной альтернативы пока еще не существует.

Если невозможно полностью отказаться от использования ДГ в удаленных районах, стоит попытаться повысить эффективность использования ресурса этих агрегатов. Одним из наиболее перспективных путей для достижения этой цели является использование дизельной установки в совокупности с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). К основным их типам относятся: энергия солнца, ветра, геотермальная, малая гидроэнергетика и энергия биомасс. К рассмотрению принимаются только первые два типа, так как геотермальная и малая гидроэнергетика могут быть использованы только в специфических местах, а энергия биомасс сравнительно малоэффективна.

ФЭУ и ВЭУ напрямую зависят от погодных условий в месте их установки и выработка мощностей этими устройствами весьма хаотична. При таких

обстоятельствах исключительное использование альтернативных источников крайне затруднительно, а рассчитать покрываемую возобновляемой энергией часть нагрузки можно приблизительно и только с использованием каких-либо итерационных алгоритмов. В связи с этим возникает проблема составления соотношения мощностей генерирующего оборудования.

Большинство, находящихся в эксплуатации и предлагаемых на рынке автономных энергетических систем, использующих ВИЭ, являются технически законченными изделиями, адаптированными под строго определенный тип энергетического оборудования, не допускающие возможности расширения их функционала и наращивания мощностей за счет подключения новых генерирующих источников. Такая ситуация обусловлена главным образом тем обстоятельством, что параметры генерируемой электроэнергии установками возобновляемой энергетики существенно различаются по основным техническим показателям, таким как род тока, частота и величина выходного напряжения.

Отсутствие на рынке возобновляемой энергетики универсальных технических устройств, обеспечивающих возможность объединения в рамках единой энергетической системы разнотипных энергетических установок с возможностью эффективного управления режимами их работы, является негативным фактором развития малой энергетики России и в то же время актуальной научной и технической задачей для практического решения [2].

Целью данной работы является повысить эффективность использования ресурса дизель-генераторов и, как следствие, снизить топливные затраты на эксплуатацию автономных маломощных электростанций, задействуя возможности возобновляемой энергетики.

Для достижения цели ставятся две задачи:

- Разработать модель гибридной СЭС с использованием ВИЭ;
- Разработать и реализовать алгоритм оптимизации выбора оборудования.

Глава 1. Анализ комбинированных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии

1.1 Анализ схем построения гибридных электростанций

Известны несколько способов сопряжения ветроэнергетических установок (ВЭУ), фотоэлектрических установок (ФЭУ) и ДГ при условии электроснабжения одного потребителя. Все эти варианты построения гибридных электростанций имеют существенные различия и по составу используемого оборудования, и по технико-экономическим параметрам.

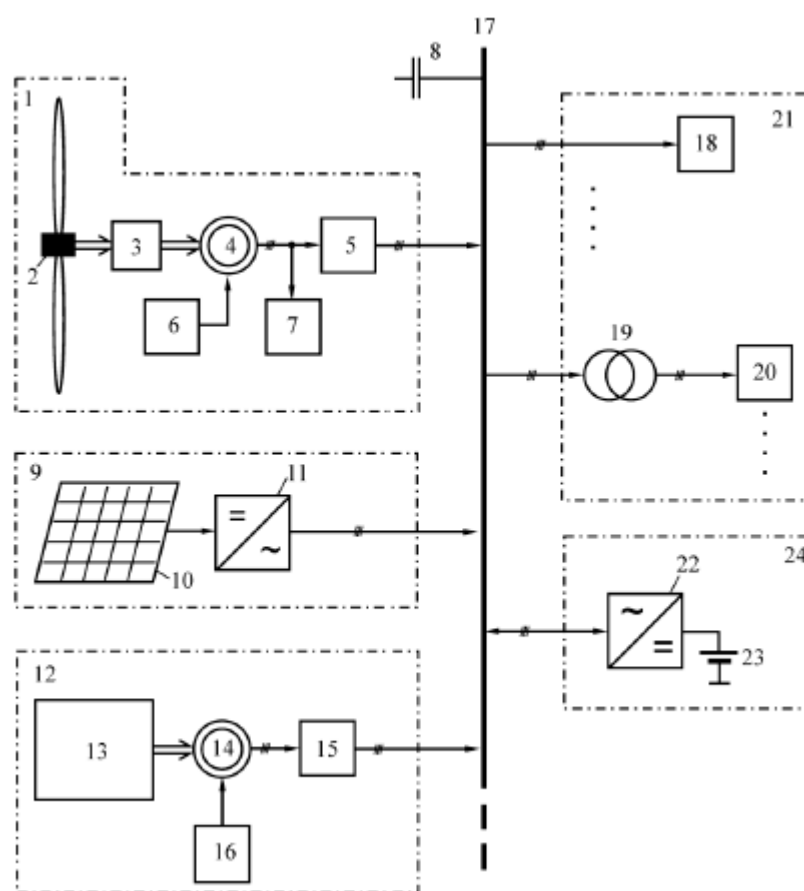
В статье [3] авторы описывают схему ветро-солнечной СЭС с уточнением конвертирующего оборудования, основанной на шине переменного тока со вставкой шины постоянного тока (ШПТ). В данной системе не предусмотрено использование ДГ, что кардинально снижает надежность электроснабжения.

Gagari Deb, Ramananda Paul, and Sudip Das в своем докладе [4] представляют модель ветро-дизельной СЭС, работающей исключительно на переменном токе. Реализация такой схемы не подразумевает наличие преобразователей, но ведет за собой ряд проблем, такие как синхронизация напряжения и частоты, следовательно, возникает необходимость использования сложной системы управления.

В работе [5] реализована модель СЭС с использованием энергии как ветра, так и солнца в сопряжении с дизель-генератором. Модель построена на трехфазной сети переменного тока со вставкой ШПТ, установлены все необходимые преобразователи, что позволяет проводить расчет краткосрочного периода, однако моделирование долгосрочного периода требует много времени и фактически затруднителен.

Статья [2] содержит в себе сравнительный анализ трех наиболее часто встречающихся способов сопряжения источников энергии (ФЭУ, ВЭУ, ДГ) и выбрана в качестве опорной для данной работы.

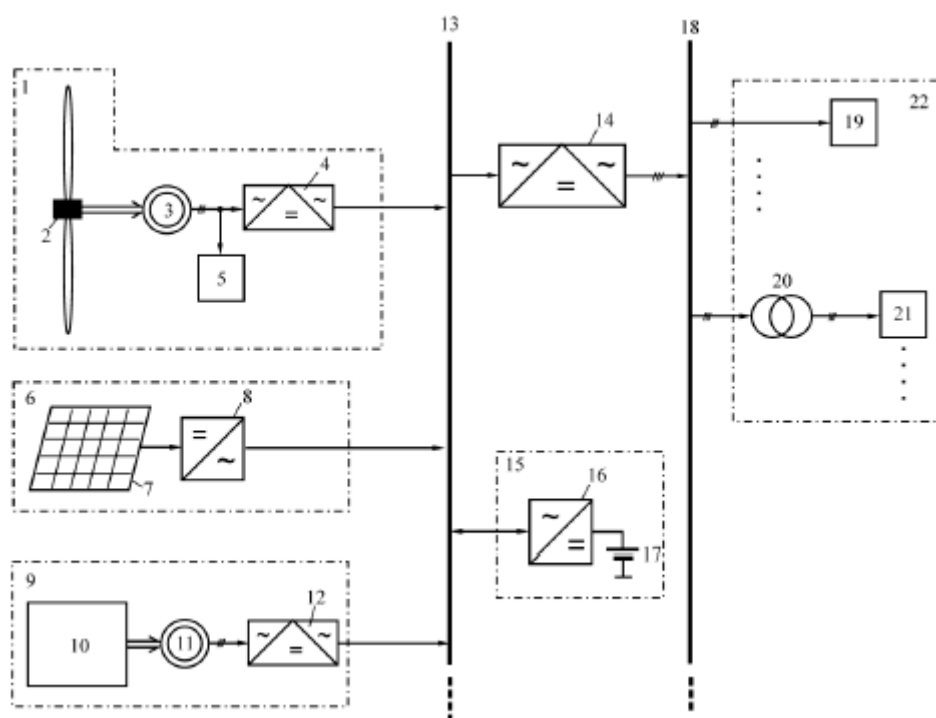
Рассмотрим первый вариант (рис.1). В данном случае используется сопряжение на шине переменного тока без каких-либо мероприятий по преобразованию электроэнергии. К достоинствам можно отнести простоту, возможность легкого масштабирования, например, установить несколько ВЭУ, также схема достаточно эффективна при наличии дополнительного подключения к магистральной сети. Однако, существует и ряд недостатков: на выходах электрических генераторов требуется обеспечить одинаковые и постоянные значения частоты и напряжения сети, что сильно удорожает вспомогательное оборудование ВИЭ.



1 – ветроэнергетическая установка; 2 – ветротурбина; 3 – редуктор-мультипликатор; 4, 14 – синхронный электромашинный генератор; 5, 15 – устройство плавного пуска; 5, 15 – регулятор тока возбуждения синхронного генератора; 7 – блок балластных нагрузок; 8 – компенсатор реактивной мощности; 9 – фотоэнергетическая установка; 10 – солнечная панель; 11 – импульсный преобразователь постоянного напряжения в переменное напряжение (инвертор); 12 – дизель-генератор; 13 – дизельный двигатель; 17 – шина переменного тока 220/380В 50 Гц; 18 – потребители электроэнергии; 19 – силовой повышающий трансформатор; 20 – потребители электроэнергии напряжением 6 или 10 кВ; 21 – объект децентрализованного электроснабжения; 22 – двунаправленный преобразователь переменного напряжения в постоянное напряжение; 23 – блок аккумуляторных батарей; 24 – буферный накопитель электроэнергии

Рис. 1 – Схема сопряжения источников на шине переменного тока

Перейдем к рассмотрению второго варианта (рис.2). Данная схема построена на принципе использования дополнительной шины высокой частоты. Этот способ удобен тем, что позволяет сократить количество реактивных элементов в системе, тем самым уменьшив стоимость. Однако, в связи с необходимостью применения дорогостоящих преобразователей и существующими проблемами потерь мощности, представленный вариант подвержен сомнению в эффективности и требует дополнительного, более углубленного изучения.

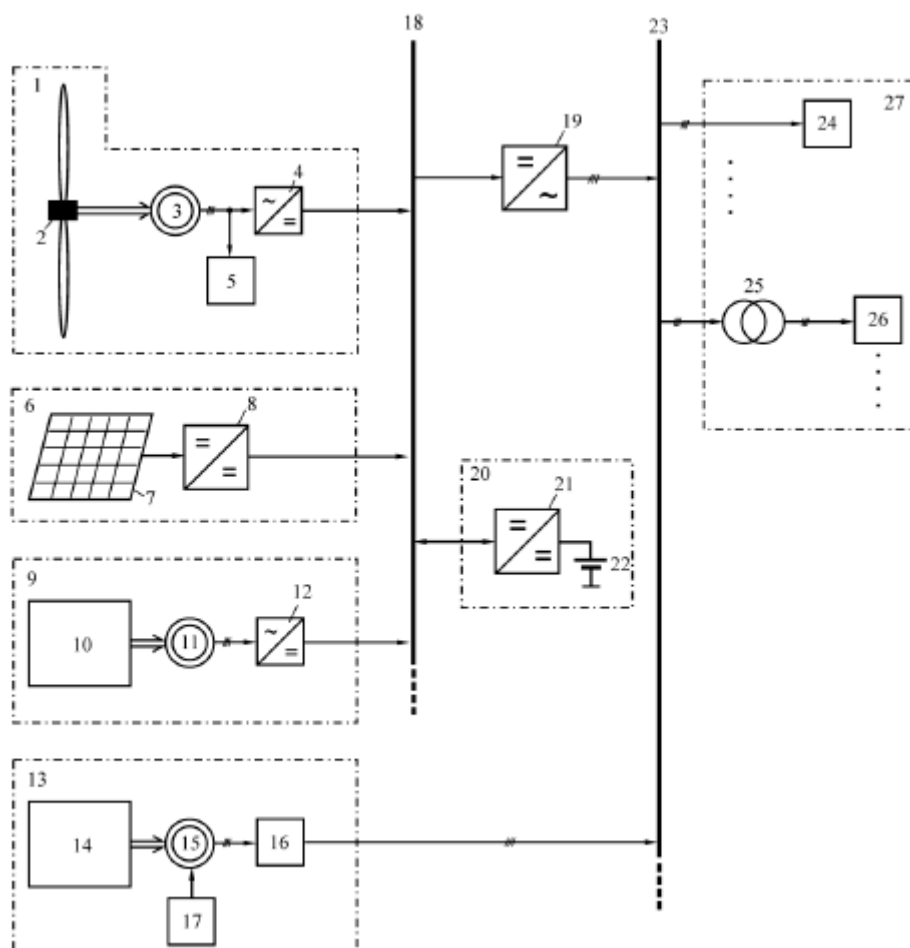


1 – ветроэнергетическая установка; 2 – ветротурбина; 3, 11 – синхронный электромашинный генератор; 4, 12, 14 – статические преобразователи частоты; 5 – блок балластных нагрузок; 6 – фотоэнергетическая установка; 7 – солнечная панель; 8 – инвертор напряжения; 9 – дизель-генератор; 10 – дизельный двигатель; 13– шина переменного тока высокой частоты; 15 – буферный накопитель электроэнергии; 16– двунаправленный импульсный преобразователь; 17 – блок аккумуляторных батарей; 18– шина переменного тока 220/380 В 50 Гц; 19– потребители электроэнергии; 20 – силовой повышающий трансформатор; 21– потребители электроэнергии напряжением 6 или 10 кВ; 22 – объект децентрализованного электроснабжения

Рис. 2 – Схема сопряжения источников на шине переменного тока высокой частоты

Также наиболее распространен еще один вариант сопряжения с использованием ШПТ, представленный на (рис. 3). Используя данную схему, сразу получаем ряд преимуществ относительно предыдущих: нет проблем с синхронизацией напряжения и частоты при включении ВЭУ и ДГ, существенно

проще и дешевле преобразователи энергии, масштабирование также не затруднено. Предоставляются широкие возможности для обособленного управления каждым источником электроэнергии. Достигается высокое качество отпускаемой энергии, т.к. потребители запитаны от одного инвертора.



1 – ветроэнергетическая установка; 2 – ветротурбина; 3, 11, 15 – синхронный электромашинный генератор; 4, 12 – управляемый выпрямитель; 5 – блок балластных нагрузок; 6 – фотоэнергетическая установка; 7 – солнечная панель; 8 – конвертор напряжения; 9, 13 – дизель-генератор; 10, 14 – дизельный двигатель; 16 – устройство плавного пуска; 17 – регулятор тока возбуждения; 18 – шина постоянного тока; 19 – инвертор напряжения; 20 – буферный накопитель электроэнергии; 21 – двунаправленный импульсный преобразователь; 22 – блок аккумуляторных батарей; 23 – шина переменного тока 220/380В 50 Гц; 24 – потребители электроэнергии; 25 – силовой повышающий трансформатор; 26 – потребители электроэнергии напряжением 6 или 10 кВ; 27 – объект децентрализованного электроснабжения

Рис. 3 – Схема сопряжения источников на шине переменного тока высокой частоты

Огромную роль в построении любых гибридных электростанций играют буферные накопители электроэнергии – блоки аккумуляторных батарей. Подключенные к сопрягающей шине любого типа с использованием

соответствующего преобразователя, они способны существенно улучшить режим работы системы. Использование в составе гибридных электростанций буферных накопителей энергии позволяет снизить долю топливной составляющей за счет замещения энергии, вырабатываемой ДГ, энергией, запасенной в накопителе при работе ВИЭ; значительно увеличить ресурс дизелей путем оптимизации их рабочих режимов; повысить уровень надежности электроснабжения потребителей за счет введения в систему по сути бесперебойного источника питания; улучшить показатели качества генерируемой энергии в динамических режимах [1].

1.2 Анализ проблемы оптимизации выбора оборудования

Основной проблемой при проектировании комбинированных электростанций является поиск оптимизации затрат, и, как следствие, поиск соотношения количества задействованных элементов. На данный момент отсутствует единственно верная и отработанная методика оптимизации, существуют только концептуальные алгоритмы, которые также имеют определенные достоинства и недостатки.

Например, Arnan Gonzalez, Jordi-Roger Riba and Antoni Rius в своей работе [6] применяют наиболее удачную схему построения на постоянном токе, передовые алгоритмы оптимизации (генетический алгоритм и метод роя частиц), но совсем не используют какие-либо накопители энергии. Также было заявлено использование расширенного массива исходных данных солнечной радиации и ветровой нагрузки (365 дней в году, почасово), но в качестве источника была указана метеорологическая станция с крайне малым диапазоном охвата регионов – только Испания, что способствует затруднительному использованию описанного алгоритма на других территориях.

В работе [7] автор демонстрирует использование программного комплекса HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) [homer], а затем предлагает свой алгоритм оптимизации. Обратив внимание на авторский код

программы, становится очевидным факт однодневной однократной оптимизации с жесткими входными параметрами, что не удовлетворяет исходным целям работы. Также стоит отметить, что HOMER – коммерческий продукт с платным использованием, результаты которого действительно наглядные, с отображением полного спектра параметров использованного оборудования. Однако в данной программе невозможно смоделировать протекающие физические процессы, что способствовало бы более четкому пониманию работы схемы.

В статье [8] приведено достаточно точное формализованное описание отдельных элементов гибридной схемы с использованием вставки на постоянном токе, также проведен простой, но корректный метод оптимизации затрат, также было произведено сравнение полученных результатов с выходными данными более сложных и точных алгоритмов оптимизации. Существенным недостатком данной работы является полное отсутствие резервного источника питания (ДГ или линии присоединения к магистрали), что позиционирует схему подключения как крайне ненадежную.

В работе Anita Gudelj и Maja Krcum [9] были использованы актуальные исходные данные из тех источников, где размещена информация для любых территорий, представлена корректная и выгодная схема построения комбинированной электростанции. Оптимизация была проведена авторским методом с использованием генетического алгоритма, но, к сожалению, не был опубликован исходный код программы, что затруднило пользование данной методикой.

Выводы по главе 1

Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что область малой энергетики исследована далеко не полностью не только на территории РФ, но и за границей. Существует множество предложений, методик, разработок, но еще ни одна не

признана эталоном, что открывает перед наукой широкие возможности для новых открытий.

Из всех вышеперечисленных схем СЭС за основу была принята схема с использованием ШПТ. В этом случае не требуется согласование режимов работы ВИЭ между собой – возможен выбор обособленных систем автоматического управления для каждой генерирующей установки. Данная система легко масштабируема: допускается изменение количества и номиналов тех или иных устройств без особого влияния на основную конструкцию схемы.

Определившись с выбором базовой конструкции СЭС, необходимо подобрать оптимальную конфигурацию оборудования. В связи с хаотичной генерацией ФЭУ и ВЭУ, рассчитать покрываемую возобновляемой энергией часть нагрузки возможно только с использованием каких-либо итерационных алгоритмов. Проанализировав доступные методы оптимизации был сделан вывод о том, что на данный момент не существует эталонного алгоритма – по разным причинам они неудобны для универсального пользования, следовательно, необходимо разработать новый способ оптимизации выбора числа и номиналов компонентов системы.

Выполнять опробацию оборудования для СЭС децентрализованных потребителей, проводя натурные эксперименты, фактически невозможно в связи с колоссальными финансовыми и временными затратами, соответственно, необходимо разработать модель, позволяющую максимально быстро рассчитывать в долгосрочной перспективе протекающие в системе процессы.

Глава 2. Разработка модели гибридной системы электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии

2.1 Обоснование и описание основных параметров модели

Предлагается модель маломощной гибридной электростанции с использованием ВИЭ (рис.4). В основе модели лежит выполнение баланса мощности. Установка включает в себя ветротурбину (ВТ), солнечную панель, буферный накопитель энергии (пару блоков аккумуляторных батарей), полезную и балластную нагрузки, дизель-генератор. В качестве узла сопряжения выступает ШПТ, номинальное напряжение которой принимается постоянным и определяется конфигурацией блоков накопителей энергии. В работе системы используются два блока АКБ – этот модуль имеет малый срок службы, а техническое обслуживание будет проводиться нечасто, следовательно, необходимо соблюдение оптимальных режимов заряда/разряда батарей.

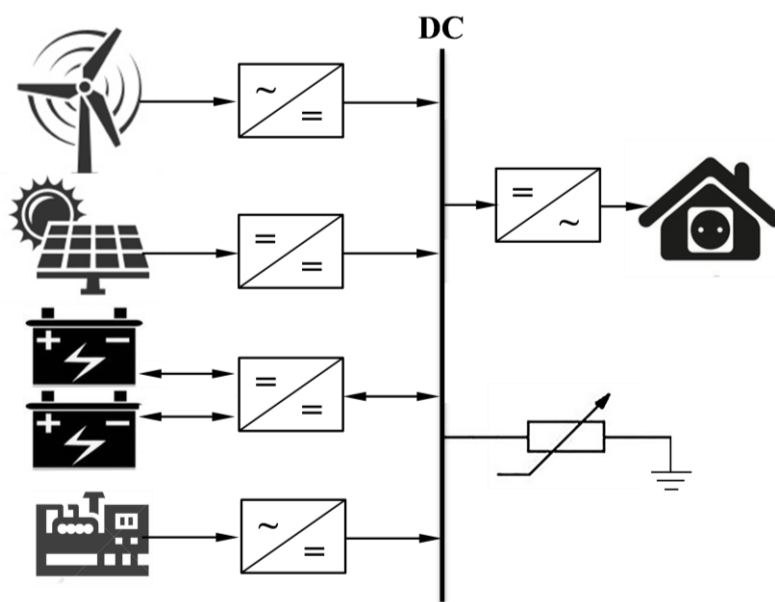


Рис. 4 – Функциональная схема гибридной электростанции

Полезный потребитель должен быть обеспечен бесперебойной подачей электроэнергии, при этом необходимо максимально полно использовать ресурсы возобновляемой энергии, а в случае их нехватки получать питание от дизель-генератора. Однако работа генератора требует затрат на топливо даже на холостом

ходу, и он должен быть отключен то время, в которое не востребован. В случае кратковременного дефицита электроэнергии следует избежать его использования, поэтому на ШПТ устанавливается буферный накопитель энергии – два блока аккумуляторных батарей, переключаемых между собой (один включен на разряд, второй – на заряд).

Возможен и другой случай: полезная нагрузка невелика, буферный накопитель полностью заряжен, дизель-генератор выключен, а возобновляемые ресурсы в избытке. Здесь используем балластную нагрузку для потребления «излишков» электроэнергии. В остальных режимах она должна быть отключена.

В качестве инструмента моделирования было выбрано ПО Matlab Simulink, возможности которого необходимы и достаточны для выполнения поставленных задач. Расчетное время одного цикла моделирования составляет 86400 секунд, что равно одним суткам. Для упрощения конструкции модели, а также для сокращения времени расчета было принято решение использовать только постоянный ток. Такое допущение не нарушит условие выполнения баланса мощности и позволит упразднить применение различного рода преобразователей энергии.

На (рис.5) представлен главный вид модели:

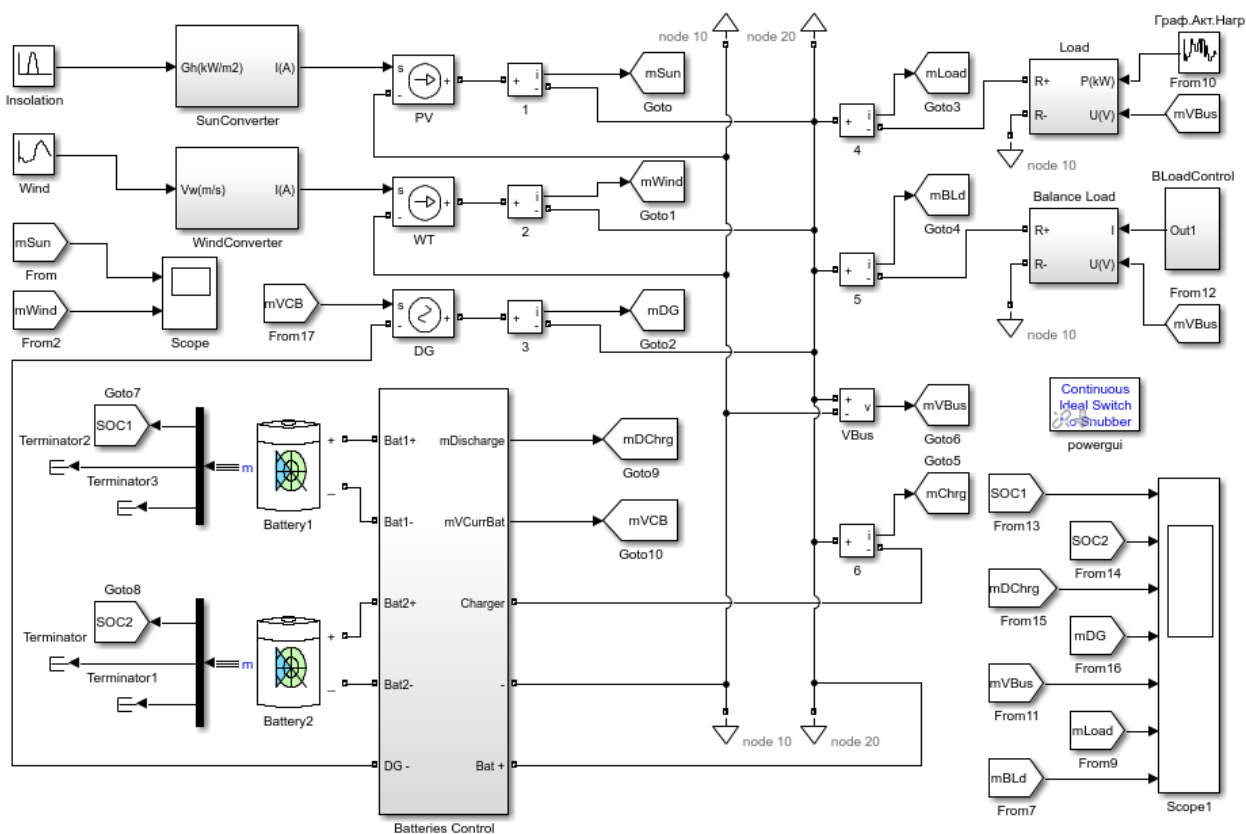


Рис. 5 – Главный вид модели

В центре изображена шина постоянного тока с обозначением «node20» - положительный потенциал и «node10» - отрицательный. С одной стороны к шине подключены источники энергии (ФЭУ, ВЭУ и ДГ), с другой – потребители (полезная нагрузка и балластная).

Переходим к подробному рассмотрению каждого элемента схемы.

2.2 Модели компонентов

2.2.1 Модель источников энергии

В качестве моделей возобновляемых источников используем управляемые источники тока, а для генератора источник напряжения. Управление каждым из них можно охарактеризовать следующими зависимостями:

$I_{sun} = f(G_h, S, U_{DC})$, где I_{sun} – ток, генерируемый солнечными модулями; G_h – текущая инсоляция; S – суммарная площадь модулей; U_{DC} – напряжение на ШПТ.

$I_{wind} = f(V_w, P_{ном}, U_{DC})$, где I_{wind} – ток, вырабатываемый ветроустановками; V_w – текущая скорость ветра; $P_{ном}$ – номинальная мощность всех ВЭУ; U_{DC} – напряжение на ШПТ.

$U_{DG} = f(U_{bat})$, где U_{DG} – напряжение ДГ; U_{bat} – напряжение батареи, находящейся в режиме заряда.

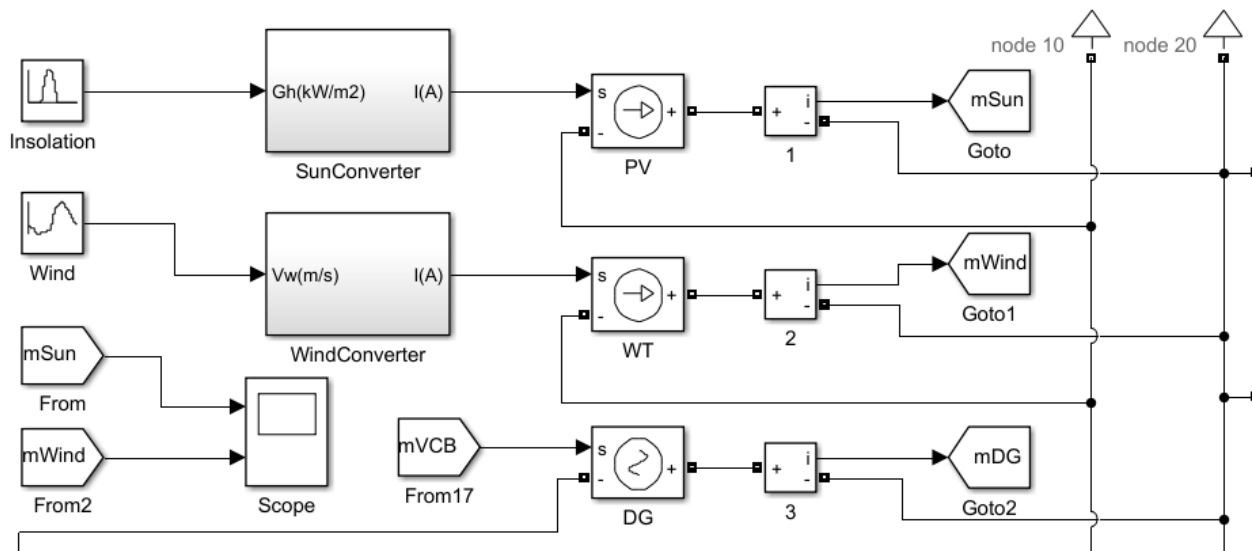


Рис. 6 – Крупный план размещения источников на схеме

Мощность источников определяется на основе реальных данных, полученных с метеорологических станций. Преобразование солнечной радиации в силу тока проводится согласно формулам:

$$P_s = \eta \cdot S \cdot G_h;$$

$$I_s = \frac{P_s}{U_{DC}}.$$

Где:

P_s – Мощность, вырабатываемая солнечными панелями;

η – КПД солнечных панелей;

S – Суммарная площадь солнечных панелей;

G_h – Инсоляция за текущий час;

I_s – Генерируемый ток;

U_{DC} – Текущее напряжение на ШПТ.

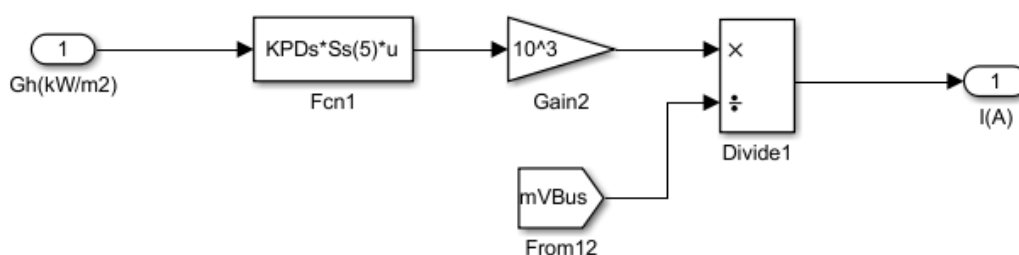


Рис.7 – Реализация зависимости $I_{sun} = f(G_h, S, U_{DC})$

Энергия ветра преобразуется следующим образом [8]:

Одним из способов задания ветроустановки является зависимость генерируемой мощности от скорости ветра – $P_v = f(V_w)$. Опираясь на конструктивные параметры агрегата, можно описать данную зависимость согласно формулам:

$$\begin{array}{ll}
 P_v = 0 & V_w < V_{\min} \\
 P_v = a \cdot V_w^3 - b \cdot P_{nomv} & V_{\min} \leq V_w < V_{nom} \\
 P_v = P_{nomv} & V_w \geq V_{nom} \\
 P_v = 0 & V_w \geq V_{\max}
 \end{array}$$

Где:

P_{nomv} – Номинальная мощность ветротурбины с учетом КПД;

V_w – Текущая скорость ветра;

$V_{\min}, V_{nom}, V_{\max}$ – Минимальная, номинальная и максимальная скорости ветра,

определяющие режим работы ветротурбины;

a, b – поправочные коэффициенты, $a = \frac{P_{nomv}}{(V_{nom}^3 - V_{min}^3)}$, $b = \frac{V_{min}^3}{(V_{nom}^3 - V_{min}^3)}$

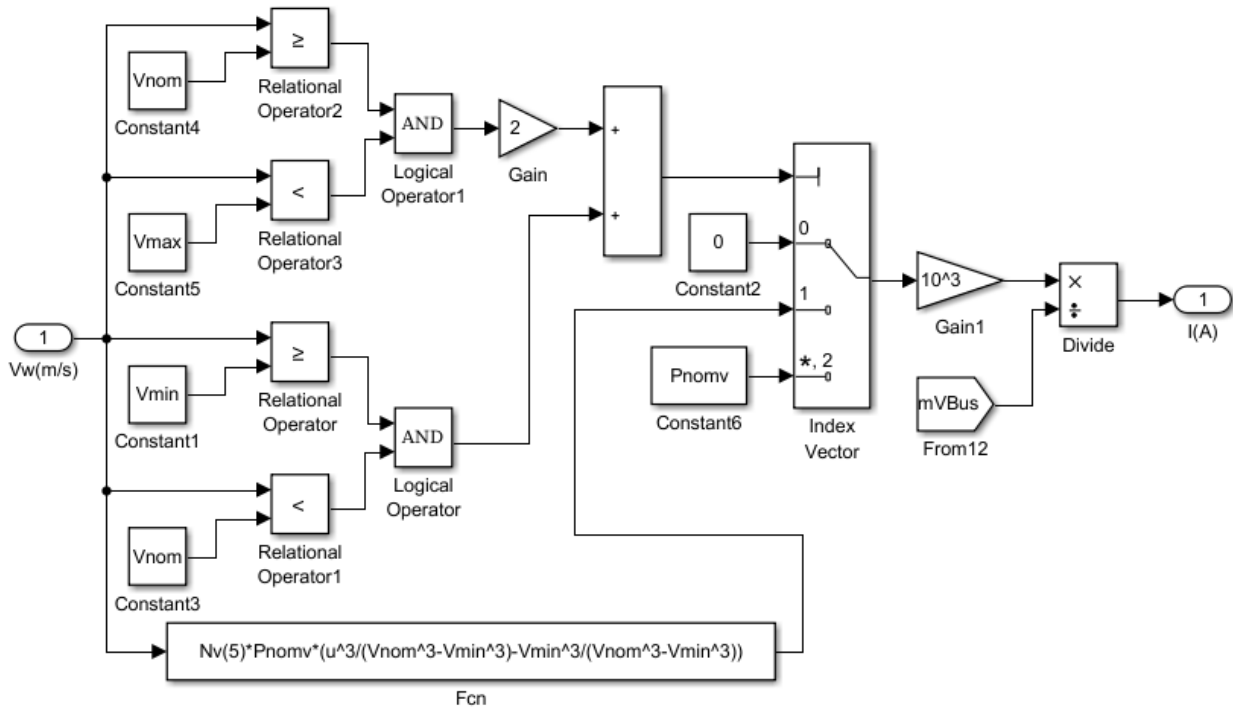


Рис. 8 – Реализация зависимости $I_{wind} = f(V_w, P_{nom}, U_{DC})$

Функция $P_v = f(V_w)$ в данном случае является кусочной и содержит в себе три интервала, три возможных варианта расчета выходного значения. Для этого в модели (рис.8) предусмотрен логический выбор интервала согласно входному значению скорости ветра, а на выходе имеется мультиплексор, который и переключает между собой варианты расчета. Получив мощность, используем закон Ома для нахождения значения тока.

Дизель-генератор задается источником напряжения бесконечной мощности; подразумевается, что установленный в реальных условиях агрегат будет выбран с тем условием, чтобы с запасом покрыть запросы потребителей, а также расходы на собственные нужды. Управление данным источником происходит с помощью обратной связи от ШПТ, о чем будет подробно рассказано ниже.

2.2.2 Модель полезной нагрузки

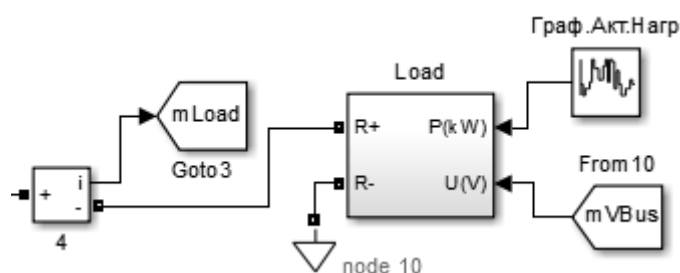


Рис. 9 – Фрагмент главной схемы, содержащий полезную нагрузку

График нагрузки как элемент Simulink создается следующим образом:

- создается Excel документ, где реализуется произвольный график нагрузки, заданный в [кВт].

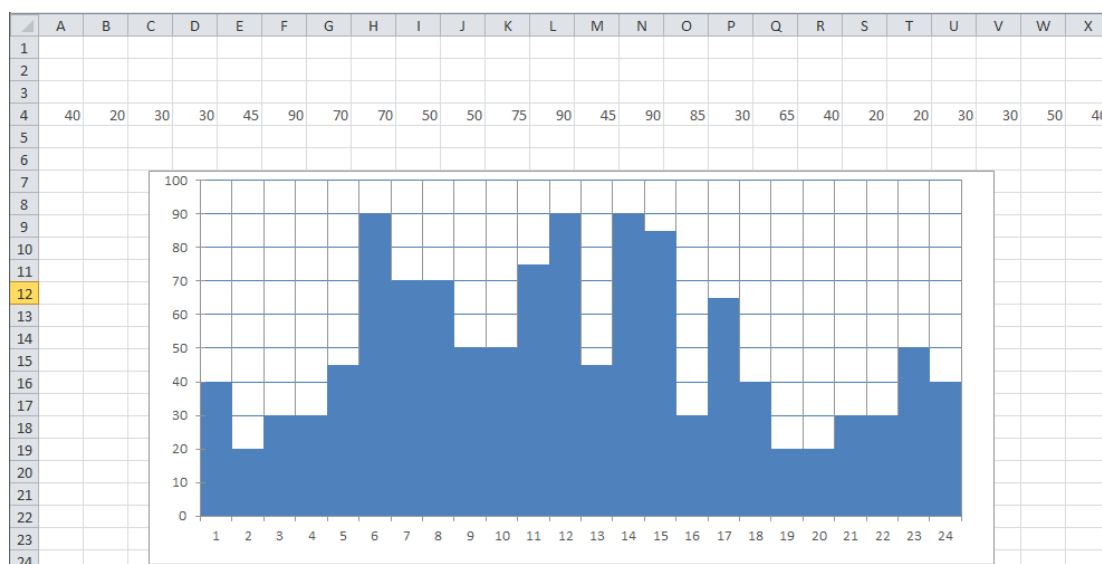


Рис. 10 – Документ Excel с графиком нагрузки

MS Excel применяется в связи с необходимостью оперативной корректировки исходных значений, а данная программа широко известна и легко управляема.

- в Matlab устанавливается модуль Repeating Sequence Stair:



- вводятся параметры модуля: в первой строке требуется вектор значений, в данном случае считываем массив данных с листа Excel, во второй – интервал переключения этих значений.

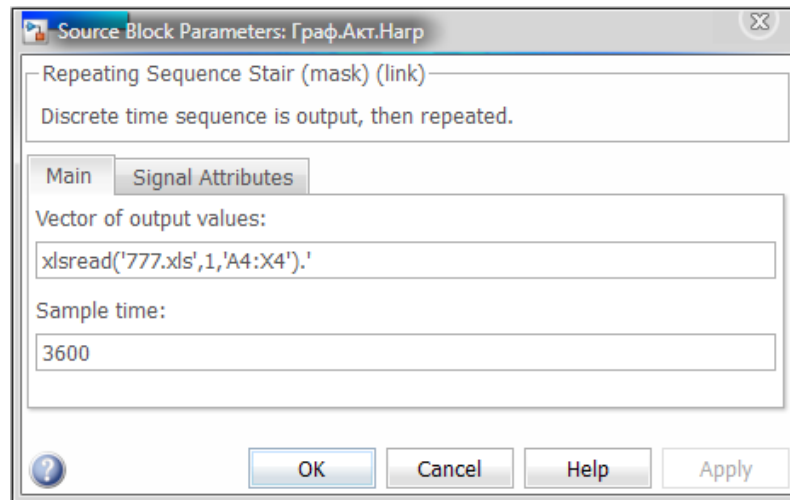


Рис. 11 – Параметры модуля *Repeating Sequence Stair*

Введя в среду Simulink график нагрузки, преобразуем его в график тока, потребляемого в течение суток, для этого необходимо реализовать переменный резистор, которого единым элементом в библиотеке не существует.

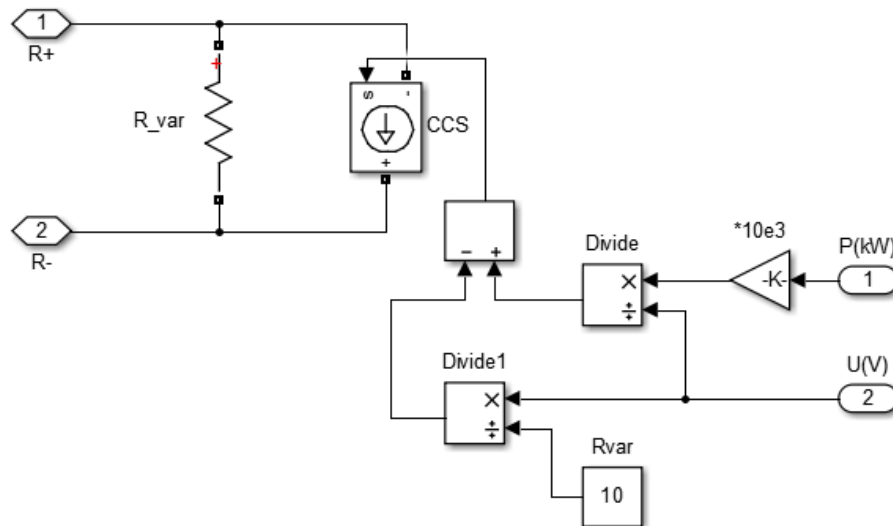


Рис. 12 – Развертка подсистемы полезной нагрузки

Представленная выше схема является подсистемой Simulink, которая имеет две силовые клеммы и две управляющие. За основу принят резистор R_{var} с

произвольно заданным сопротивлением 10 Ом. Максимальный ток, который может протекать через такой резистор (при $U=\text{const}$) равен $U/10$.

2.2.3 Модель балластной нагрузки

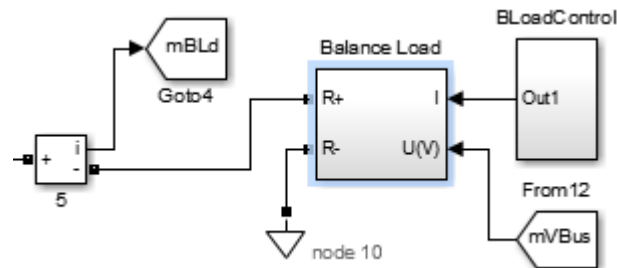


Рис. 13 – Фрагмент главной схемы с балластной нагрузкой

Как уже было сказано выше, балластная нагрузка компенсирует чрезмерную выработку энергии возобновляемыми источниками. По факту, это переменный резистор, поэтому схему этого элемента выберем схожей со схемой полезной нагрузки, но с другим видом управления.

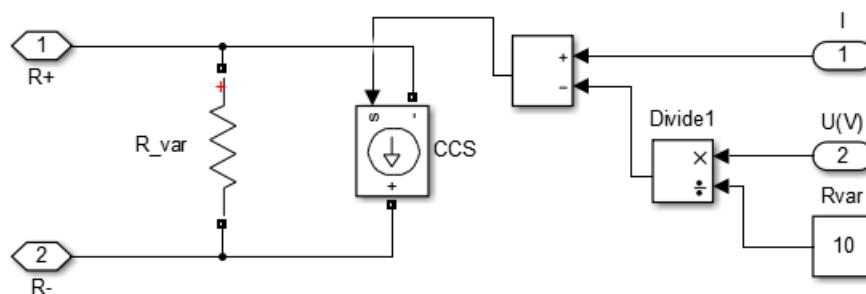


Рис. 14 – Развертка подсистемы балластной нагрузки

Теперь об управлении. Если в полезной нагрузке был использован график нагрузки в киловаттах, то здесь необходимо подвести ток, который должна потребить нагрузка в конкретный момент времени. Это обеспечивается следующей логикой: «Балластная нагрузка должна быть задействована то время, пока суммарная выработка энергии солнечных элементов и ветровой турбины больше, чем требуется для обеспечения полезной нагрузки и заряда батарей, при этом дизель-генератор должен быть выключен».

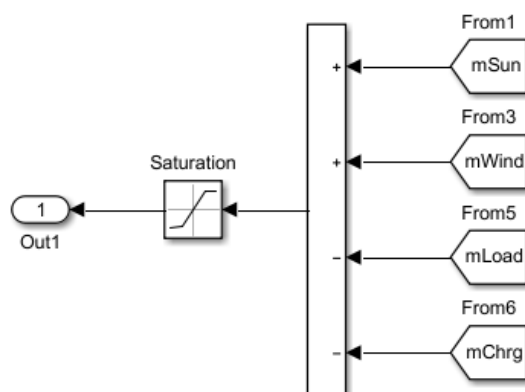


Рис. 15 – Развертка подсистемы управления балластной нагрузкой

На (рис.15) присутствуют следующие параметры:

- mSun – ток солнечных панелей;
- mWind – ток ветроустановок;
- mLoad – ток, потребляемый нагрузкой;
- mChrg – ток, расходуемый на зарядку батарей.

В цепи управления балластной нагрузкой присутствует блок «Saturation», служащий для ограничения по току: в процессе работы схемы возникает вероятность обратных перетоков мощности, когда на сумматоре (рис.15) образуется отрицательное значение, в результате чего балластная нагрузка начинает работать в режиме дополнительного источника питания относительно ШПТ, что является критической ошибкой в логике работы схемы. «Saturation» все отрицательные значения на выходе из сумматора ограничивает нулем, т.е. балластная нагрузка отключена. Верхний лимит установлен произвольно (500А), лишь с одним условием: положительные значение ограничиваться не должны.

2.2.4 Модель блоков аккумуляторных батарей

Неотъемлемым элементом схемы являются блоки батарей и логика их управления. Необходимо поддерживать стабильное напряжение на ШПТ и одновременно не допускать чрезмерного разряда батарей, что влечет за собой

серьезную просадку по напряжению, для чего следует их своевременно переключать между собой.

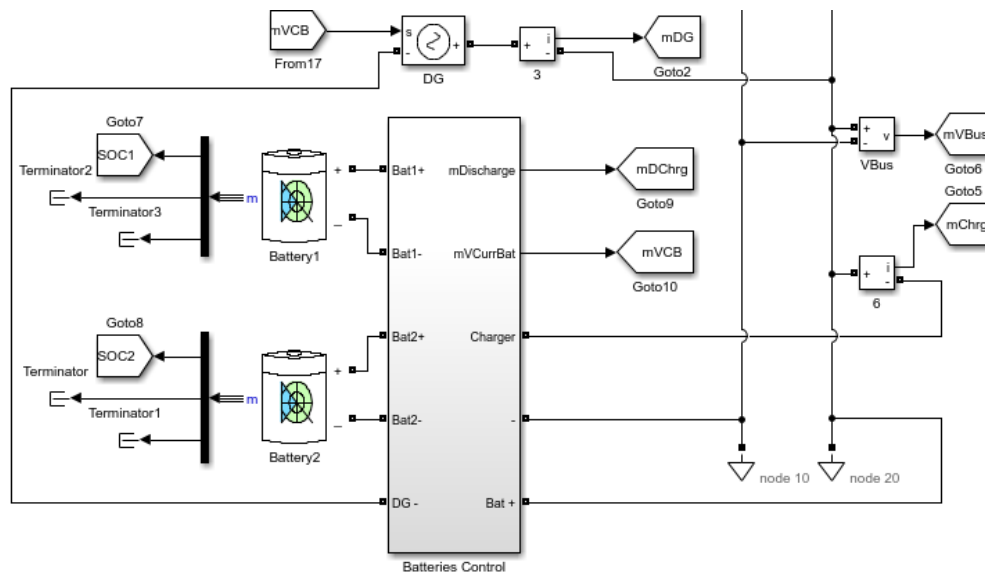


Рис. 16 – Фрагмент главной схемы с батареями и их контроллером

В Simulink есть готовый элемент «Батарея», функционал которого полностью удовлетворяет требованиям схемы. Этот элемент имеет один выходной информационный канал «m», который содержит в себе вектор из трех потоков значений: текущая емкость (%), напряжение на батарее (В), ток разряда (А). Из этого потока значений нам нужно только первое – емкость (далее в тексте и на рисунках схемы – SOC). В связи с чем ставится элемент «Demux» для распараллеливания потоков, однако используем только первый канал, два оставшихся заземляем с помощью элементов «Terminator».

Для полного понимания принципа работы и логики переключений контроллера батарей составим блок-схему (рис.17) и развернем subsystem управления батареями (рис.18).

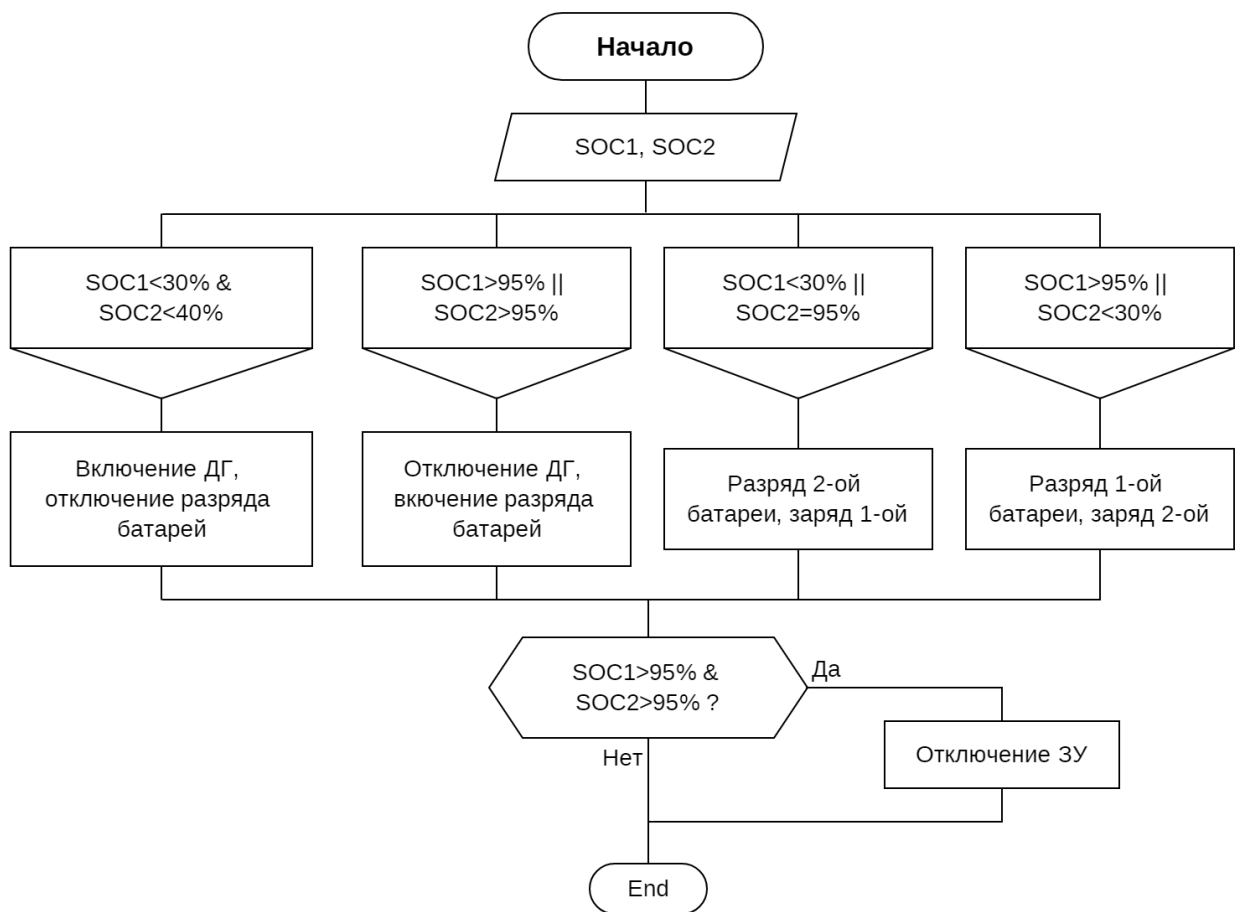


Рис. 17 – Блок схема контроллера батарей

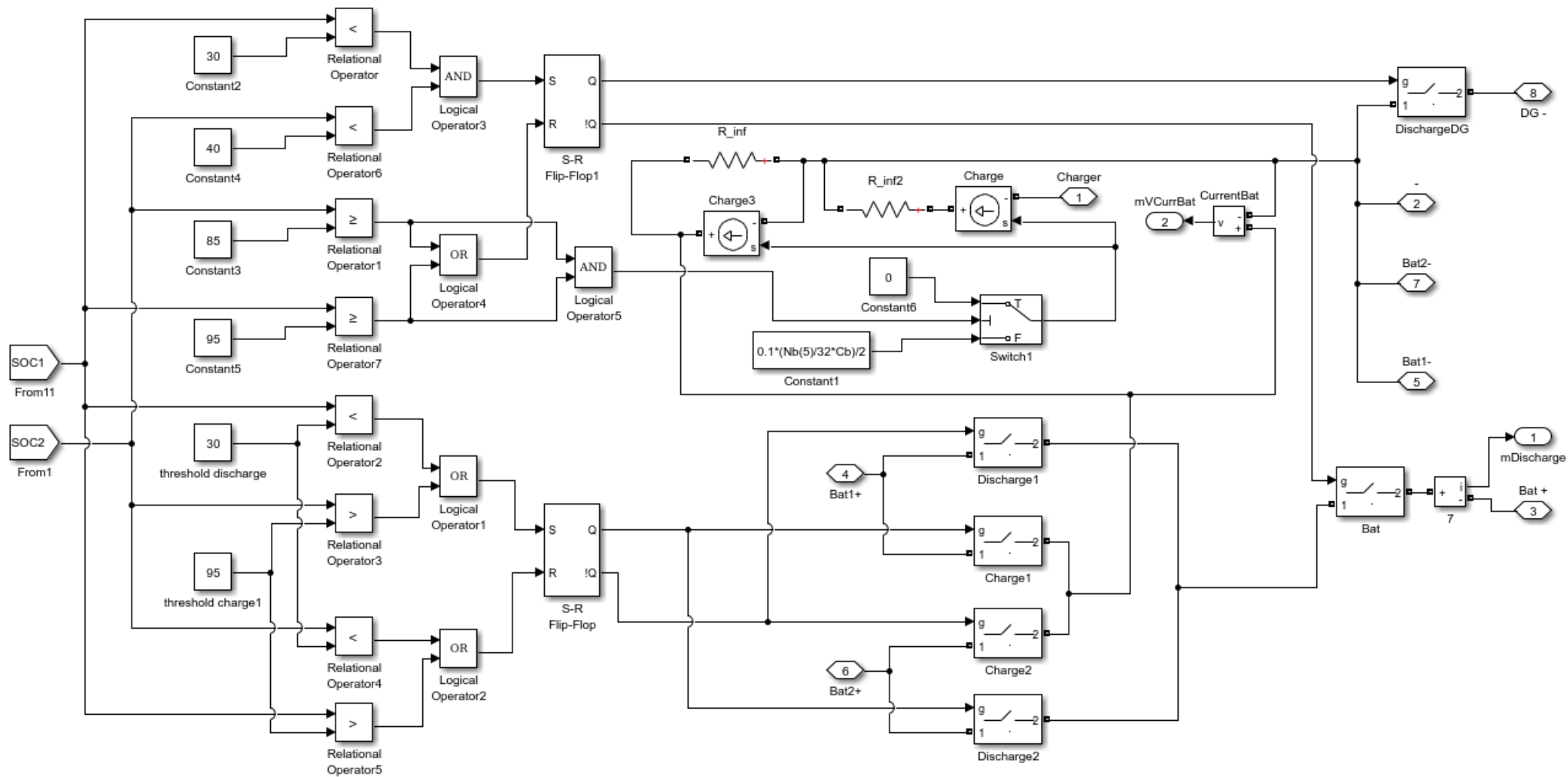


Рис. 18 – Развертка подсистемы контроллера батарей

Как видно из (рис.18), имеются два основных входных параметра: SOC1 и SOC2. Рассматриваем левую нижнюю часть схемы. Проходя через цепочку логических элементов, сигналы, полученные с этих информационных каналов, управляют RS-триггером, который, в свою очередь, воздействует на четыре выключателя. При этом один блок батарей включается на разряд, второй в тот же момент переводится в режим заряда. Цепочка логических элементов воспроизводит следующий алгоритм: «Триггер переключается в том случае, если одна из батарей разряжена до 30% или наоборот, заряжена до 95%».

Рассматриваем левую верхнюю часть схемы. Как и в нижней части, в верхней также содержится цепочка логических элементов и RS-триггер. На этот раз триггером управляется выключатель силовой цепи дизель-генератора и отсекающий выключатель блока батарей. Первый ключ запускается, когда одна из батарей разряжена до 30% или другая – до 40%. Здесь специально применяется разносящий интервал для исключения ошибок логики, в противном случае при приближении емкости обеих батарей к 30% наблюдаются бесконечные их переключения вплоть до критической ошибки расчета модели, так как один блок батарей успевает зарядиться на доли процента. В момент замыкания первого ключа, во избежание негативных перетоков мощности, необходимо обеспечить ШПТ единственным устройством, поддерживающим напряжение: во время работы дизель-генератора обе батареи отключаются от шины вторым выключателем и переходят в режим заряда.

Рассматриваем правую верхнюю часть схемы. В ней находится зарядное устройство. Ток заряда батарей принят численно равным 10% от суммарной емкости заряжаемых в текущий момент времени аккумуляторов. Очевидно, что энергия для заряда батарей должна поступать с ШПТ, но для корректного расчета схемы была выполнена развязка зарядного устройства и ШПТ: применены два источника тока. Один из них стабильно потребляет зарядный ток с ШПТ, расходуя его на бесконечно большое сопротивление, а второй

генерирует тот же ток, заряжая аккумуляторы. В этой же части схемы определяется уровень заряда аккумуляторов до верхнего предела (95%) и в этом случае происходит отключение зарядного устройства. Напряжение работы дизель генератора непостоянно и зависит от напряжения заряжаемой в данный момент времени батареи – эту логику обеспечивает вольтметр, установленный на выводных клеммах зарядного устройства.

Решение о непостоянном напряжении ДГ было принято в связи со следующими рассуждениями. Так как разряженная батарея имеет напряжение ниже нормы, а заряженная – выше, то если установить постоянное значение напряжения работы агрегата, сравнимое с напряжением заряженной батареи – возникнет скачок в момент включения дизель-генератора. Если установить напряжение сравнимое с напряжением разряженной батареи, то произойдет просадка по напряжению в момент отключения агрегата и подключения полностью заряженной батареи. Вариант «установить среднее значение» также не желателен – будут скачки в обоих моментах коммутации.

2.2.5 Обработка метеорологических сведений

Исходными данными для моделирования ФЭУ и ВЭУ в первую очередь являются статистические погодные данные, полученные с метеорологических станций. Под погодными данными следует понимать скорость ветра и инсоляцию на горизонтальную плоскость за сутки для конкретной точки на местности, определяемой координатами.

Оперировать массивными статистическими данными, полученными из источников, крайне неудобно, кроме того, данные содержат только прямые измерения, при необходимости косвенных. Исходя из этого, следует преобразовать исходные данные для удобного восприятия, а также структурировать их для корректного ввода в модель. Было принято решение

автоматизировать этот процесс с помощью программы MS Excel. Информация с каждого листа представлена в [Приложения А, Б].

Для получения данных о ветровой обстановке используется ресурс [10], доступная статистика которого содержит в себе прямые измерения скорости ветра (м/с) каждые сутки, через каждые три часа, в течение выбранного периода времени (принят равным семи последним годам). Полученные данные подвергаются обработке следующим образом:

- Производится выборка измерений скорости ветра в каждое доступное время (12:00ч, 15:00ч, и т.д.), в средний день каждого месяца за весь период анализируемого времени (7 лет);
- Выбранные значения усредняются;
- Так как прямые измерения проводятся раз в три часа, проводим линейную интерполяцию полученных усредненных значений для определения скорости ветра в каждый час среднего дня;
- Выполняется построение графических зависимостей.

Получив наглядные графические данные, а также табличные, пригодные для использования в модели, приступим к анализу солнечной энергетики. В отличие от ветровой нагрузки, солнечную радиацию измерить гораздо сложнее, поэтому даже в принятом первоисточнике [11] измерения являются косвенными. Автоматизация процесса обработки исходных данных инсоляции заключается в следующем: по географическим координатам из источника запрашиваем параметр Gd – «Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m²/day)» – инсоляцию на горизонтальную плоскость за средний день каждого месяца в течение 22-ух лет (период постоянен и не подлежит изменению в источнике), затем, следуя методике (рис.19) [12, стр.2-3], преобразуем полученные данные в удобные для восприятия и для корректного ввода их в модель.

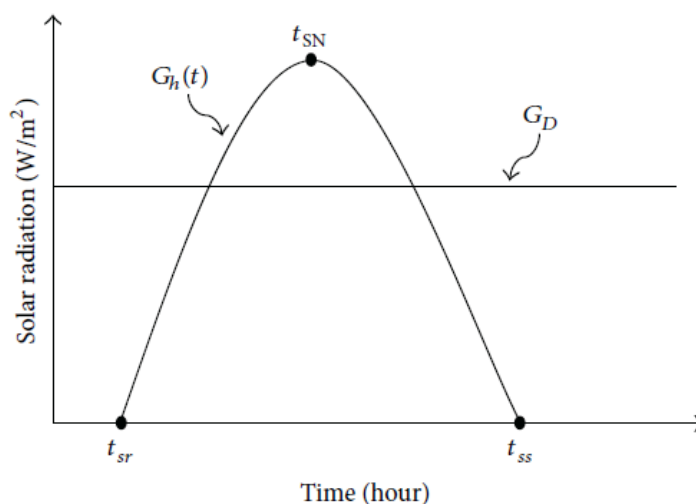


Рис. 19 – Расчет почасовой солнечной радиации, используя ее среднее значение

Подробнее рассмотрим методику расчета почасовой солнечной радиации:

$$G_h = \frac{\left(\frac{\pi}{24}\right) \cdot (\cos \omega - \cos \omega_s)}{\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s} \cdot G_d, \text{ Вт / м}^2, \text{ где}$$

G_h – почасовая солнечная радиация;

G_d – дневная солнечная радиация;

ω – часовой угол, угловое смещение Солнца от локальной точки;

ω_s – часовой угол восхода и заката.

$$\omega = 15^\circ \cdot (AST - 12), \text{ где}$$

AST – Apparent Solar Time, явное или истинное солнечное время, определяется ежедневным кажущимся движением наблюдаемого солнца.

Видимое солнечное время можно рассчитать следующим образом:

$$AST = LST + EoT + \left(4 \frac{\text{min}}{\text{deg}}\right) \cdot (LSMT - LOD), \text{ где}$$

LST – Local Standart Time, текущее местное время;

LOD – Longitude, долгота;

EoT – Equation of Time, поправка времени, разность между кажущимися и средними солнечными временами, взятыми по заданной долготе в тот же самый реальный момент времени;

LSMT – Local Standart Meridian Time, эталонный меридиан в конкретном часовом поясе;

$$LSMT = 15^\circ \cdot TZ, \text{ где}$$

TZ – Time Zone, часовой пояс исследуемой местности;

$$EoT = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B), \text{ где}$$

B – поправочный коэффициент, который рассчитывается как:

$$B = \frac{360^\circ}{365} \cdot (N - 81), \text{ где}$$

N – порядковый номер дня в году.

$$\omega_s = \frac{1}{\cos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta)}, \text{ где}$$

φ – широта;

δ – угол склонения.

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + N)}{365}\right).$$

В качестве примера рассмотрим богатый возобновляемыми ресурсами регион – Дальневосточной, а именно г.Владивосток ($43^\circ 07' 00''$ с.ш. $31^\circ 54' 00''$ в.д.)[13].

Обратившись к источнику [10] и обработав полученные из него данные о скорости ветра, получаем результаты, указанные в (табл.1) и на (рис.20-31)

Табл. 1 – Средняя скорость ветра в регионе

	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00
Dec	6,17	6,15	6,18	6,23	6,25	6,24	6,23	6,22
Jan	6,05	6,11	6,11	6,11	6,11	6,15	6,24	6,28
Feb	5,77	5,81	5,76	5,67	5,62	5,67	5,78	5,83
Mar	5,24	5,22	5,18	5,10	5,06	5,05	5,04	5,03
Apr	5,48	5,40	5,31	5,13	5,05	5,05	5,06	5,07
May	5,45	5,32	5,29	5,24	5,21	5,18	5,12	5,09
Jun	5,42	5,40	5,27	5,02	4,89	4,83	4,71	4,64
Jul	5,48	5,44	5,34	5,14	5,04	5,06	5,10	5,13
Aug	5,14	5,06	5,00	4,86	4,80	4,83	4,91	4,95
Sep	4,66	4,61	4,66	4,75	4,80	4,81	4,82	4,83
Oct	5,84	5,81	5,79	5,75	5,72	5,68	5,61	5,57
Nov	6,15	6,16	6,19	6,26	6,30	6,28	6,26	6,25

Продолжение табл. 1 – Средняя скорость ветра в регионе

	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Dec	6,21	6,19	6,18	6,22	6,30	6,33	6,37	6,45
Jan	6,26	6,24	6,23	6,34	6,56	6,68	6,70	6,74
Feb	5,79	5,71	5,66	5,85	6,21	6,39	6,40	6,41
Mar	4,98	4,87	4,82	5,10	5,66	5,94	6,03	6,23
Apr	5,11	5,21	5,26	5,58	6,23	6,56	6,67	6,89
May	5,11	5,16	5,18	5,43	5,92	6,17	6,34	6,69
Jun	4,66	4,71	4,73	4,93	5,35	5,55	5,65	5,85
Jul	5,14	5,18	5,20	5,33	5,59	5,72	5,86	6,13
Aug	4,88	4,75	4,68	4,85	5,20	5,37	5,47	5,67
Sep	4,82	4,81	4,80	4,98	5,33	5,50	5,57	5,71
Oct	5,52	5,42	5,37	5,49	5,73	5,85	5,93	6,10
Nov	6,20	6,10	6,04	6,14	6,32	6,42	6,40	6,35

Окончание табл. 1 – Средняя скорость ветра в регионе

	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Dec	6,49	6,42	6,30	6,23	6,23	6,23	6,24	6,22
Jan	6,76	6,58	6,22	6,04	5,99	5,90	5,85	5,91
Feb	6,42	6,27	5,99	5,85	5,80	5,70	5,65	5,69
Mar	6,33	6,27	6,15	6,09	5,90	5,51	5,31	5,29
Apr	7,00	6,87	6,60	6,47	6,29	5,92	5,74	5,66
May	6,86	6,79	6,63	6,56	6,38	6,02	5,84	5,71
Jun	5,95	5,92	5,86	5,83	5,75	5,58	5,50	5,47
Jul	6,26	6,21	6,10	6,05	5,94	5,72	5,61	5,57
Aug	5,76	5,72	5,63	5,59	5,53	5,42	5,37	5,29
Sep	5,78	5,65	5,38	5,24	5,13	4,90	4,79	4,74
Oct	6,18	6,11	5,96	5,89	5,89	5,90	5,91	5,88
Nov	6,33	6,26	6,13	6,06	6,08	6,13	6,15	6,15

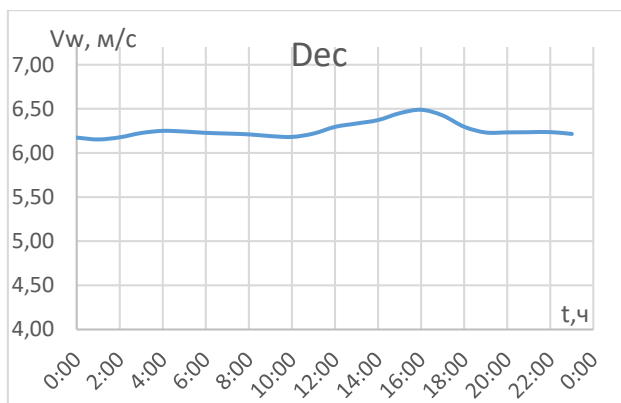


Рис. 20 – Скорость ветра в декабре

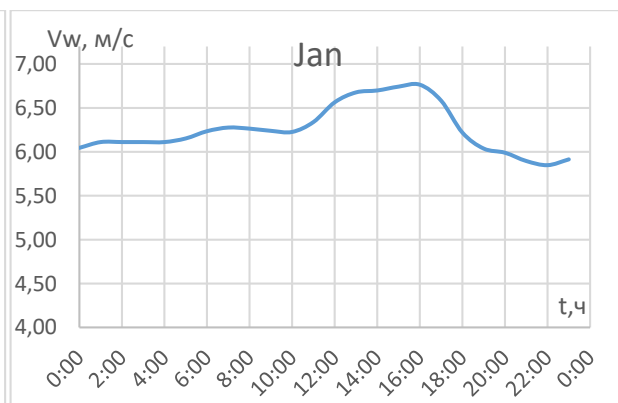


Рис. 21 – Скорость ветра в январе

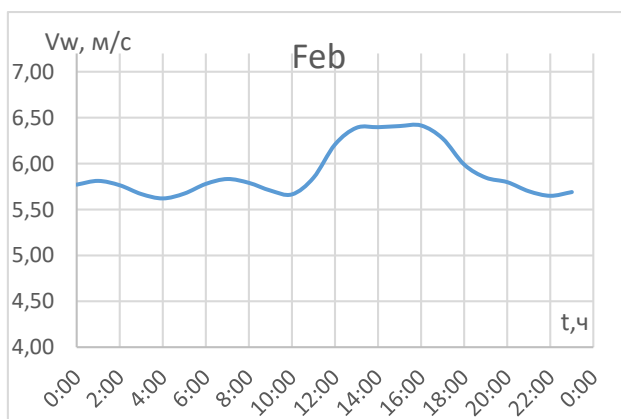


Рис. 22 – Скорость ветра в феврале

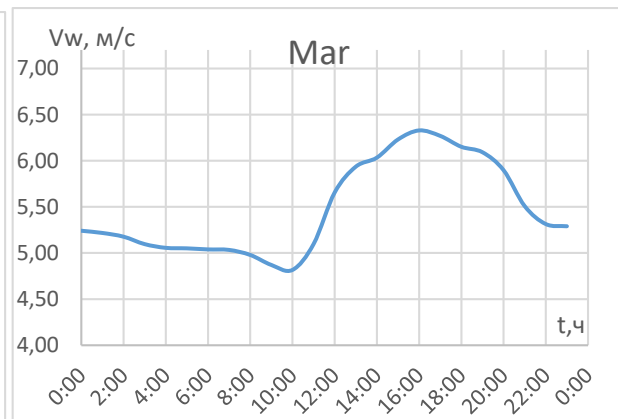


Рис. 23 – Скорость ветра в марте

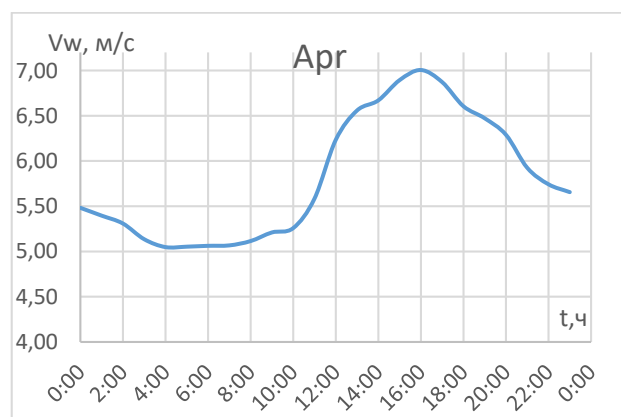


Рис. 24 – Скорость ветра в апреле

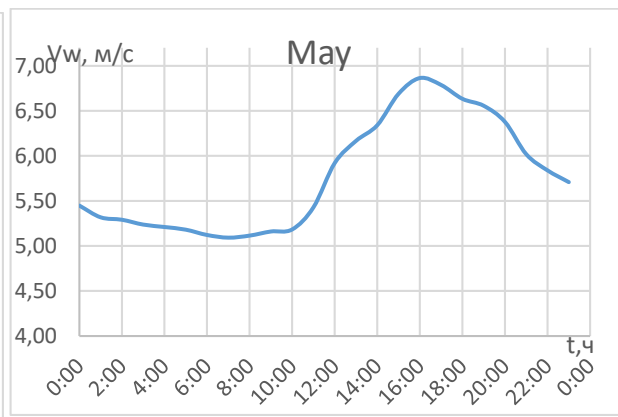


Рис. 25 – Скорость ветра в мае

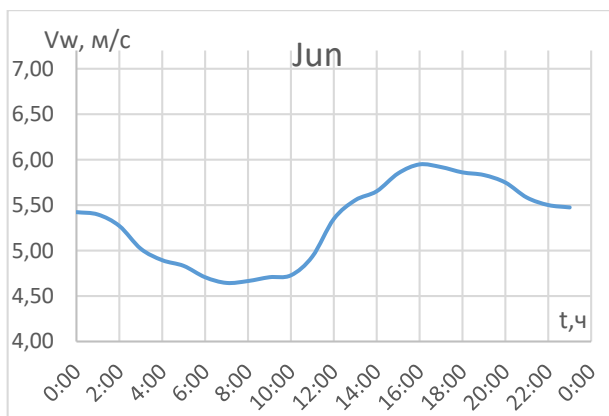


Рис. 26 – Скорость ветра июне

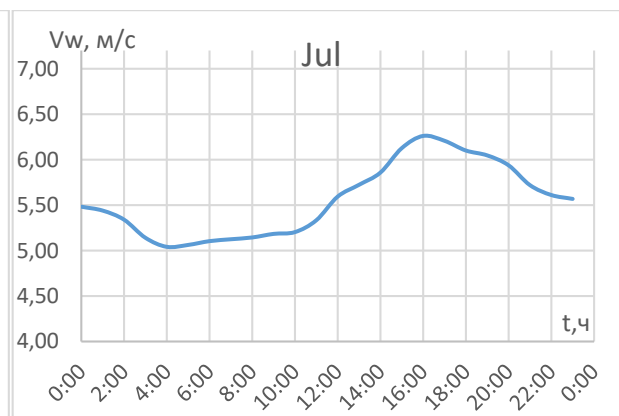


Рис. 27 – Скорость ветра в июле

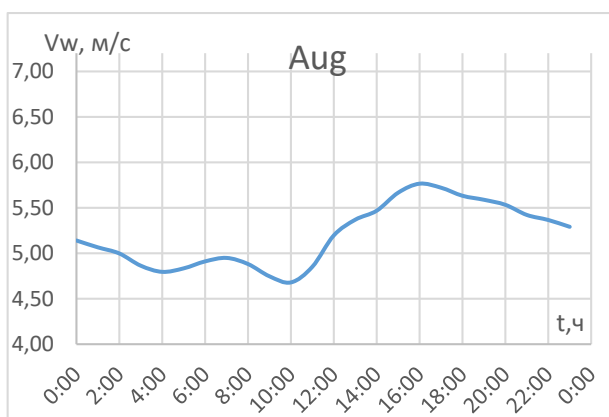


Рис. 28 – Скорость ветра в августе

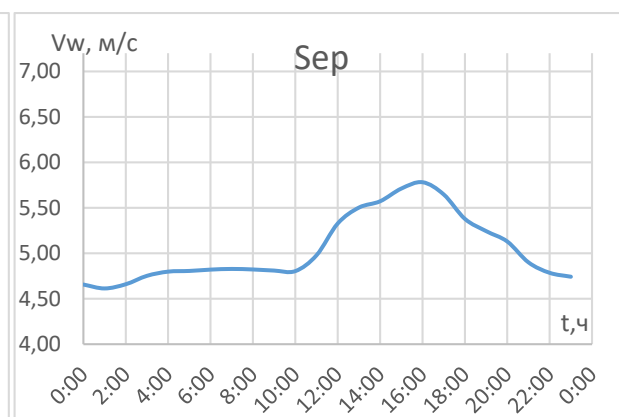


Рис. 29 – Скорость ветра в сентябре

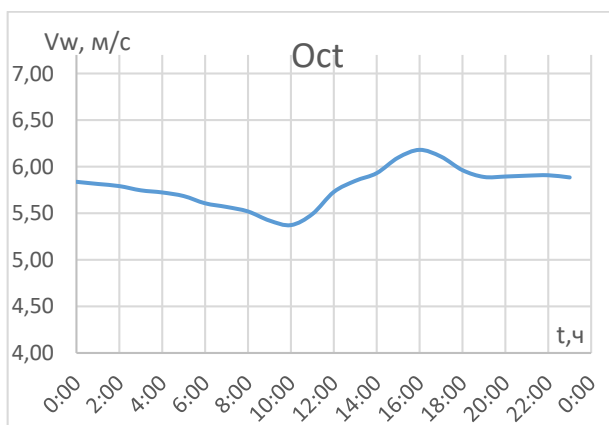


Рис. 30 – Скорость ветра в октябре

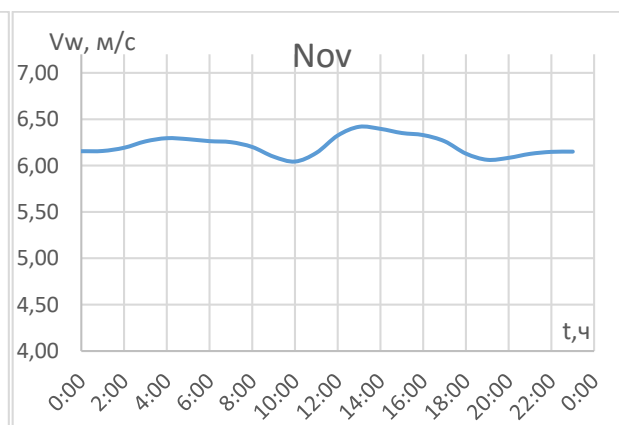


Рис. 31 – Скорость ветра в ноябре

Примечание: обработка данных и построение графиков происходит автоматически с помощью программы MS Excel. Далее приводится лишь пример расчета для полного понимания принципа подготовки данных.

Расчет почасовой инсоляции анализируемой местности для июня:

Определим угол склонения. Средние дни месяцев и соответствующие им углы склонения – значения табличные и неизменные [14, табл. 1.6.1].

Табл.2 – Углы склонения Солнца для среднего дня каждого месяца

Месяц	Средний день	Порядковый номер	Угол склонения
Январь	17	17	-20.9
Февраль	16	47	-13.0
Март	16	75	-2.4
Апрель	15	105	9.4
Май	15	135	18.8
Июнь	11	162	23.1
Июль	17	198	21.2
Август	16	228	13.5
Сентябрь	15	258	2.2
Октябрь	15	288	-9.6
Ноябрь	14	318	-18.9
Декабрь	10	344	-23.0

Принимаем $N = 162$; $\delta = 23.1^\circ$

Солнечный угол для широты $\varphi = 43^\circ$ (г.Владивосток):

$$\omega_s = \frac{1}{\cos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta)} = \frac{1}{\cos(-\operatorname{tg}(43^\circ) \cdot \operatorname{tg}(23.1^\circ))} = 1.08 \text{ рад}$$

Поправочный коэффициент:

$$B = \frac{360^\circ}{365} \cdot (N - 81) = \frac{360^\circ}{365} \cdot (162 - 81) = 1.39^\circ$$

Выражение времени:

$$EoT = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B) = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot 1.39^\circ) - 7.53 \cdot \cos(1.39^\circ) - 1.5 \cdot \sin(1.39^\circ) = 0.61 \text{ ч}$$

Определим эталонный меридиан для $TZ = +10$ (г. Владивосток):

$$LSMT = 15^\circ \cdot TZ = 15^\circ \cdot 10 = 150^\circ$$

Рассчитаем истинное солнечное время при местном времени 12 ч для долготы $LOD = 132^\circ$ (г. Владивосток):

$$AST = LST + EoT + \left(4 \frac{\text{min}}{\text{deg}}\right) \cdot (LSMT - LOD) = 12 + \frac{0.61 + \left(4 \frac{\text{min}}{\text{deg}}\right) \cdot (150^\circ - 132^\circ)}{60} = 13.21 \text{ ч}$$

Часовой угол:

$$\omega = 15^\circ \cdot (AST - 12) = 15^\circ \cdot (13.21 - 12) = 18.15^\circ$$

Определим величину солнечной радиации 11 июня в 12 ч местного времени при $G_d = 5.21 \text{ кВт} / \text{м}^2$:

$$G_h = \frac{\left(\frac{\pi}{24}\right) \cdot (\cos \omega - \cos \omega_s)}{\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s} \cdot G_d = \frac{\left(\frac{\pi}{24}\right) \cdot (\cos(18.15^\circ) - \cos(1.08))}{\sin(1.08) - 1.08 \cdot \cos(1.08)} \cdot 5.21 \cdot 1000 = 873 \text{ Вт} / \text{м}^2$$

Аналогичным способом расчет проводится для каждого часа среднего дня каждого месяца. Результаты представлены в (табл.) и на (рис.32-43).

Табл. 3 – Почасовая инсоляция в регионе

	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00
Dec	66	193	286	339	347	311	233	118
Jan	20	186	314	393	419	389	307	177
Feb	0	240	456	593	643	601	471	261
Mar	0	339	641	828	888	817	619	307
Apr	28	442	750	932	975	877	643	291
May	126	518	806	973	1005	902	669	323
Jun	144	502	768	924	960	873	669	361
Jul	67	384	624	770	813	748	582	324
Aug	20	364	623	779	822	748	563	279
Sep	43	383	633	775	800	706	499	195
Oct	90	339	516	610	615	530	361	119
Nov	88	246	359	419	422	367	259	105

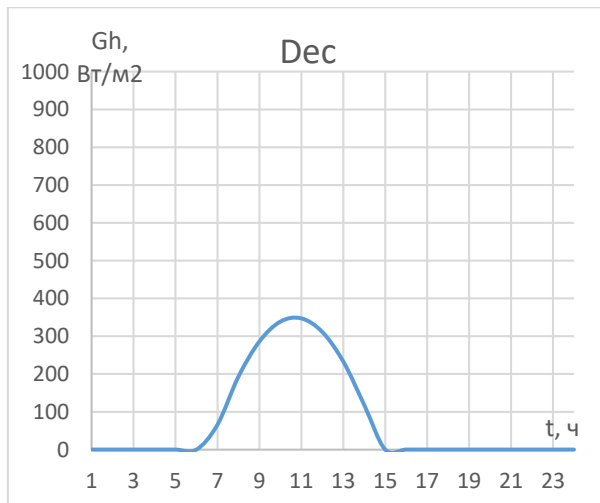


Рис. 32 – Инсоляция в декабре

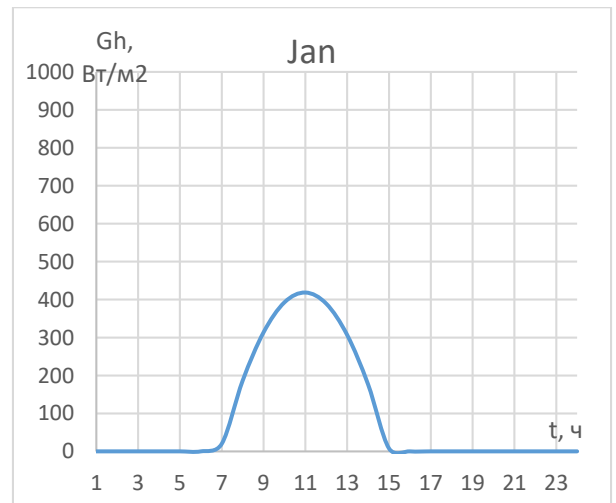


Рис. 33 – Инсоляция в январе

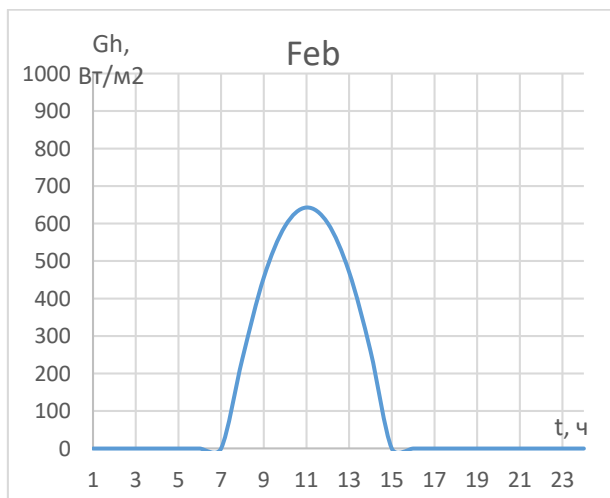


Рис. 34 – Инсоляция в феврале

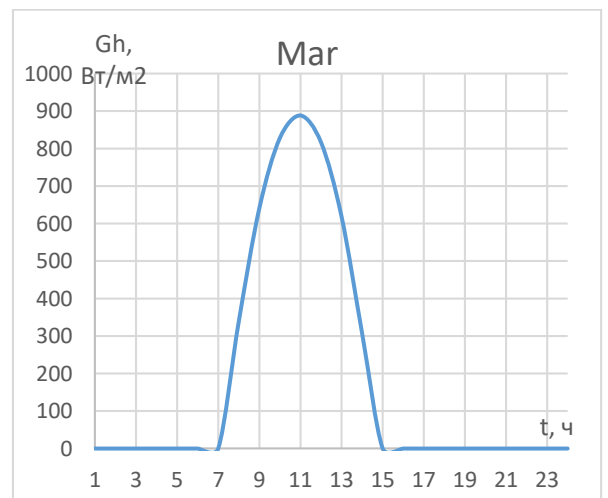


Рис. 35 – Инсоляция в марте

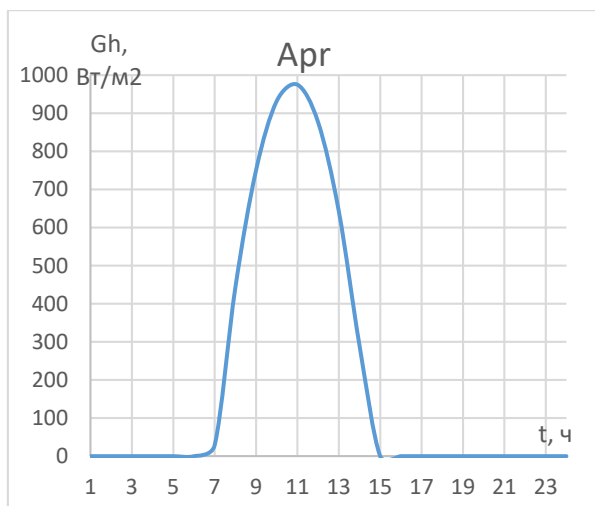


Рис. 36 – Инсоляция в апреле

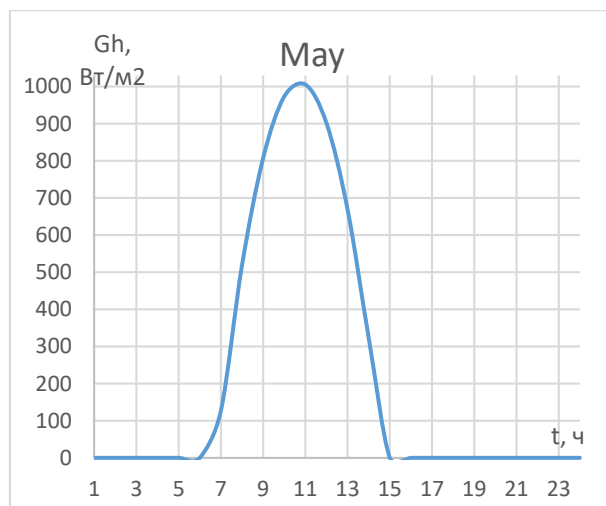


Рис. 37 – Инсоляция в мае

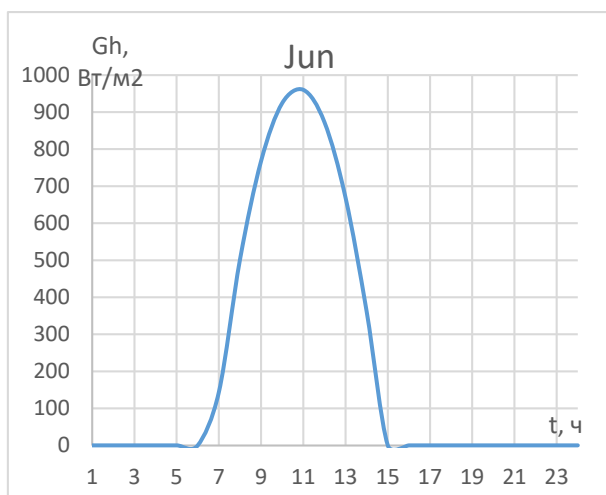


Рис. 38 – Инсоляция в июне

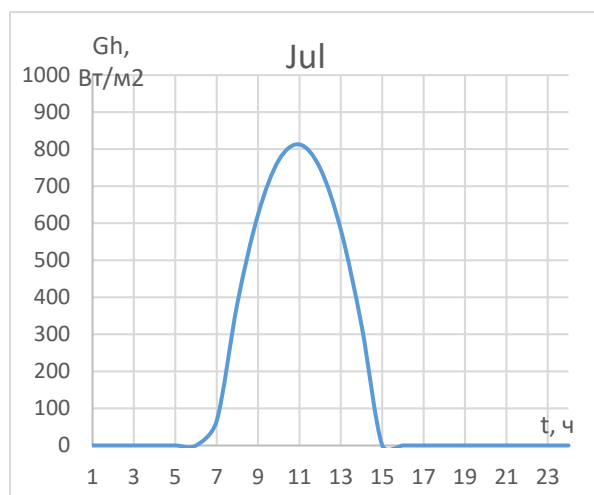


Рис. 39 – Инсоляция в июле

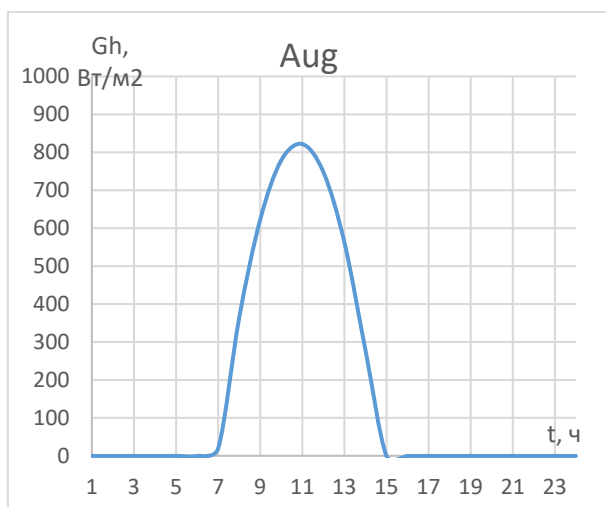


Рис. 40 – Инсоляция в августе

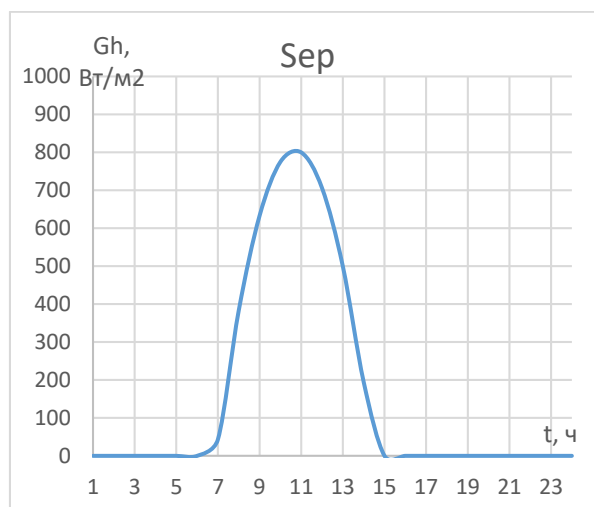


Рис. 41 – Инсоляция в сентябре

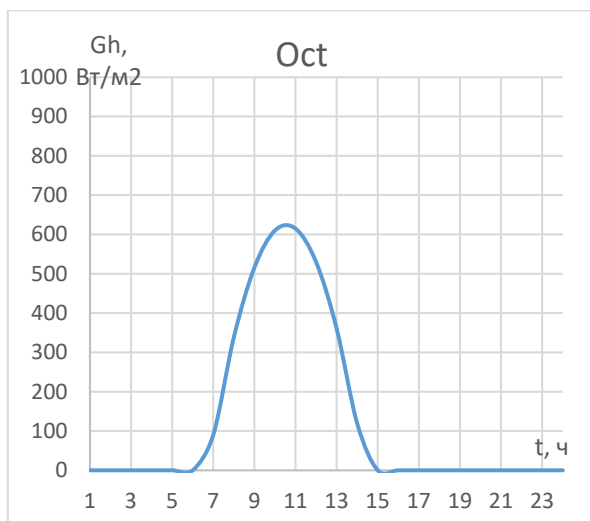


Рис. 42 – Инсоляция в октябре

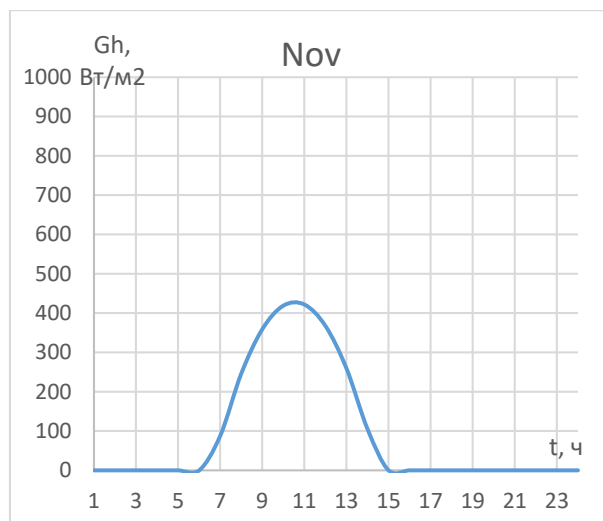


Рис. 43 – Инсоляция в ноябре

2.2.6 Аprobация разработанной модели

Проведем тестирование разработанной модели. Рассмотрим произвольные исходные параметры:

- Метеорологические данные принимаются для г.Владивостока за июль.
- График нагрузок произвольный (рис.44).
- Установленная мощность ВЭУ – 10 шт. по 30 кВт.
- Площадь солнечных панелей – 300 м².
- Количество и емкость АКБ – 100 шт. по 200 Ач.

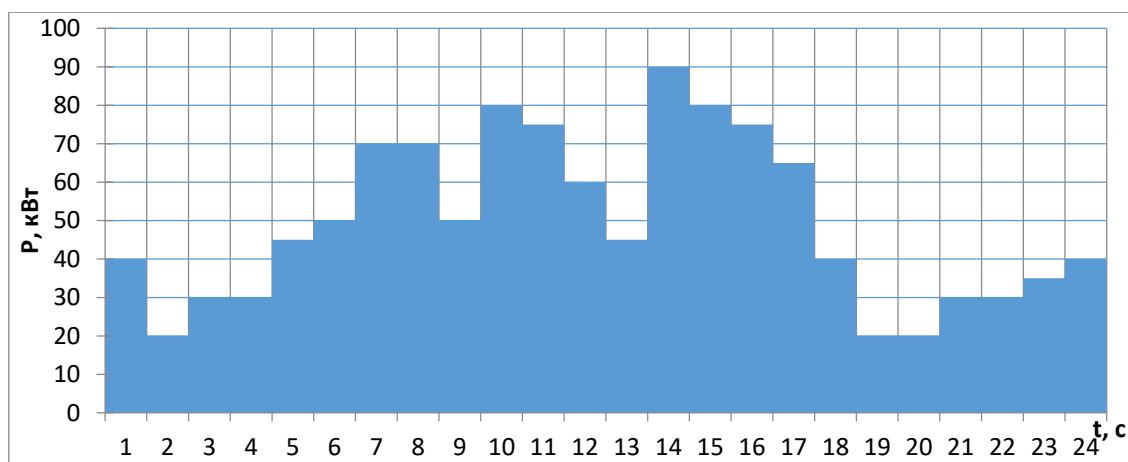


Рис. 44 – Произвольно выбранный график нагрузок

Результатом расчета являются осциллограммы, представленные на (рис.45,46)

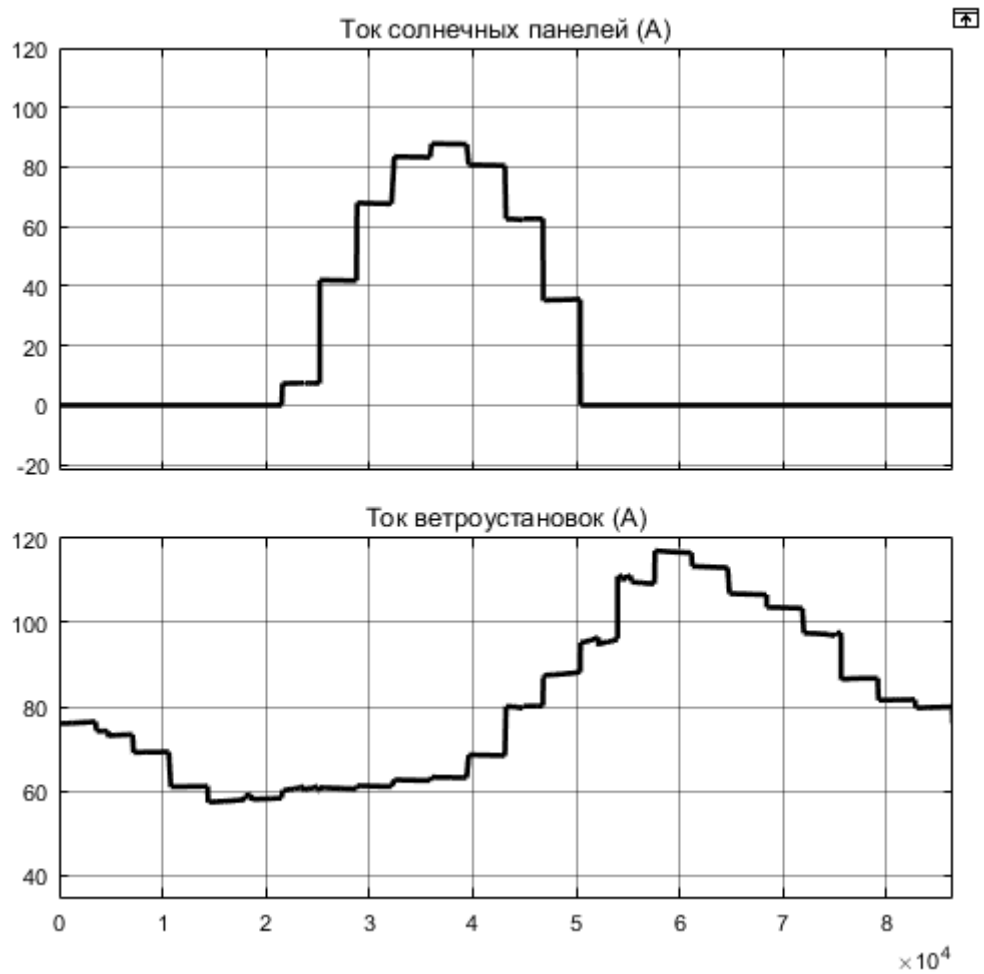


Рис. 45 – Суточная генерация энергии ФЭУ и ВЭУ в июле

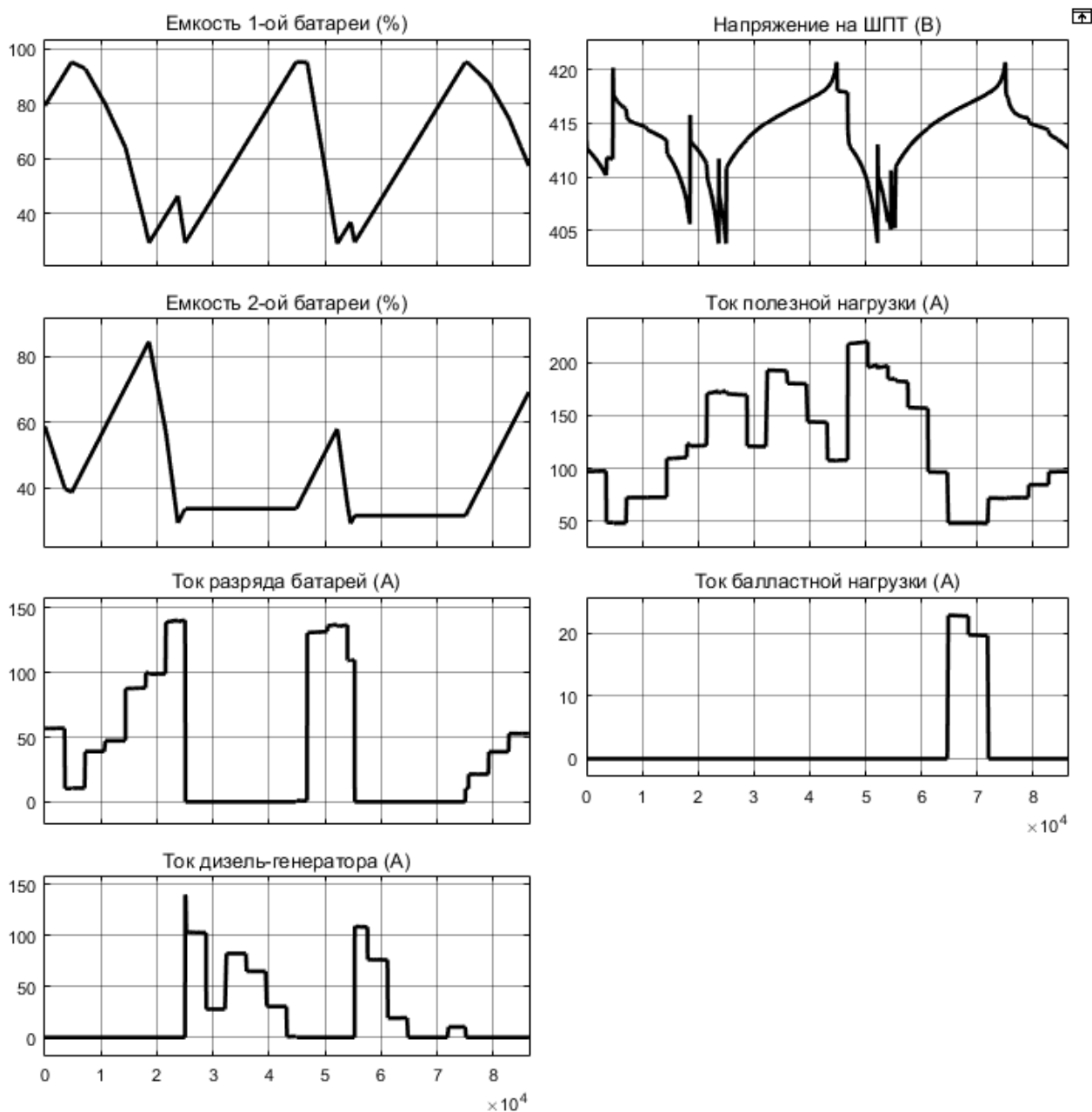


Рис. 46 – Результаты моделирования средних суток июля

Анализируя осциллограммы (рис.46) следует сделать вывод, что все компоненты системы работают правильно, а именно: график нагрузок полностью обеспечен энергией, блоки батарей по мере разряда/заряда переключаются между собой. В часы нехватки запасенной энергии и энергии ВИЭ запускается ДГ и заряжает один из блоков батарей, в моменты профицита возобновляемой энергии подключается балластная нагрузка. Напряжение на ШПТ равно 410 ± 10 (В), что является допустимым. Модель корректна и готова к применению.

Выводы по главе 2

В этой главе была обоснована и разработана модель гибридной системы электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии. С помощью данной модели становится возможным наблюдение за поведением каждого из элементов схемы, во время ее работы. В основе конструкции находится шина постоянного тока, на которой сопрягаются три вида источников энергии, две нагрузки (полезная и балластная) и пара блоков аккумуляторных батарей. Расчет модели проводился с использованием только постоянного тока и при этом не был нарушен основной физический закон – баланс мощности. Такое допущение позволило не вводить в модель громоздкие преобразователи, что свело время моделирования к минимуму.

В качестве входных параметров могут выступать любые значения: как произвольные, так и расчетные, с возможностью быстрой замены.

При моделировании ВИЭ были использованы реальные метеорологические данные, описан процесс их обработки и применения к модели.

В заключении полученная схема была апробирована с использованием произвольных входных параметров. Результаты теста показывают, что модель работает корректно и готова к применению.

Глава 3. Разработка и реализация алгоритма оптимизации выбора оборудования

3.1 Общее описание алгоритма

С целью подбора оптимальной конфигурации системы, необходимо предложить и реализовать алгоритм выбора оборудования. Критерием оптимизации выступит минимум затрат целевой функции.

Алгоритм соответствует следующему принципу. В основе лежит функция затрат $f(x) = C_{y\partial 1} \cdot W_{\Phi \text{ЭУ}} + C_{y\partial 2} \cdot W_{B \text{ЭУ}} + C_{y\partial 3} \cdot W_{\text{ДГ}}$, которая подвергнется минимизации, где:

$W_{\Phi \text{ЭУ}}, W_{B \text{ЭУ}}, W_{\text{ДГ}}$ – реальная годовая выработка ЭЭ солнечными панелями, ветрогенераторами и дизель-генератором соответственно;

$C_{y\partial 1}, C_{y\partial 2}, C_{y\partial 3}$ – удельные затраты на выработку ЭЭ каждым источником.

Главным условием работы алгоритма является выполнение баланса мощности. В качестве исходных данных применяется паспортные данные оборудования ВИЭ, ДГ, а также реальные значения инсоляции и скорости ветра в заданном регионе. Преобразованием исходных данных и расчетом определяется реальная годовая выработка ЭЭ эталонной единицей ФЭУ и ВЭУ. Затем производится вычисление удельных затрат на владение каждой эталонной единицей при определенной годовой выработке. Минимизируя целевую функцию затрат, выявляется оптимальное количество эталонных солнечных модулей и ветротурбин для каждого месяца, а также предполагаемое использование ДГ. Т.к. зависимости стоимости единиц ВИЭ от их номинальных мощностей близки к линейным, результаты оптимизации принимаются гибкими и рекомендованное количество эталонных элементов может быть заменено на пропорциональное количество элементов с другими номинальными мощностями. Далее производится более точное, почасовое, вычисление дефицита/профицита энергии и определяется количество эталонных АКБ, рекомендованных к установке.

На (рис.47) представлена блок-схема предлагаемого алгоритма.

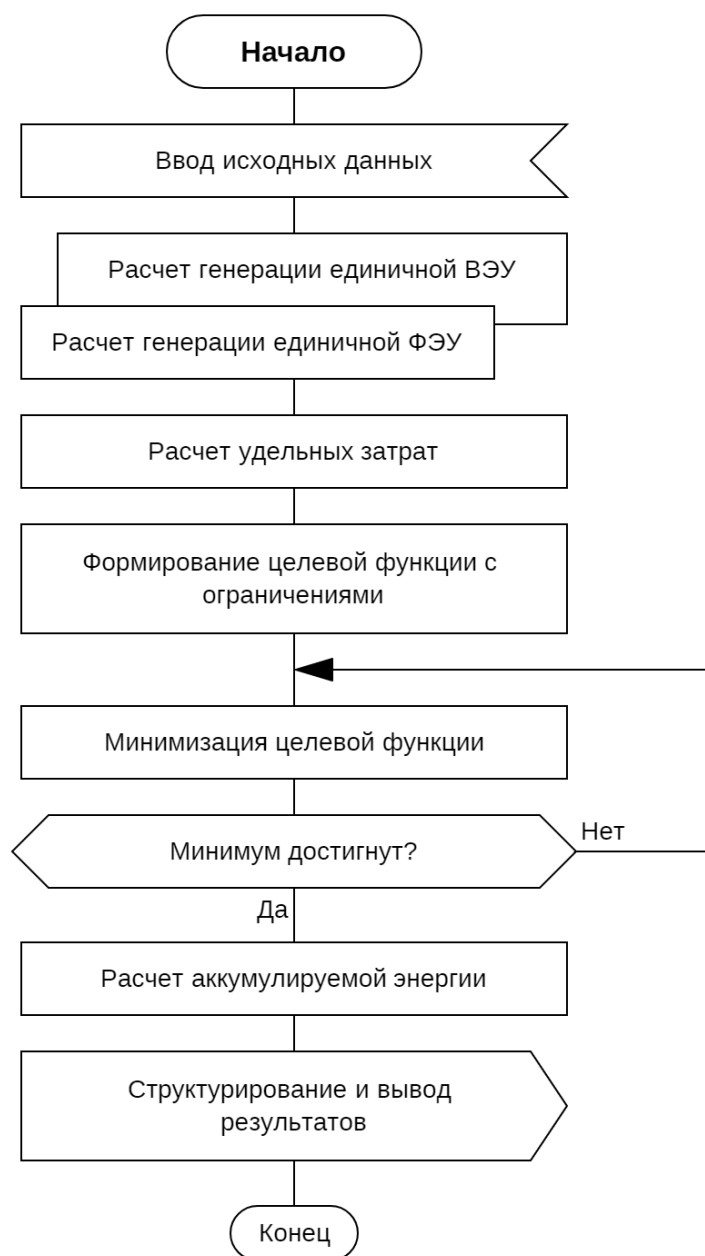


Рис. 47 – Блок схема предлагаемого алгоритма

3.2 Ввод исходных данных

В качестве исходных данных выступают метеорологические данные и паспортные для каждого компонента. Помимо погодных данных, указанных ранее (см.п.2.2.5), остальные необходимые входные параметры представлены ниже.

Определение ВЭУ:

- Номинальная мощность единичной установки (кВт);
- КПД (о.е.);
- Минимальная, номинальная, максимальная скорости ветра, определяющие режим работы ветроколеса (м/с);
- Срок службы по паспорту (г.);
- Цена (р.);
- Максимально допустимое количество (шт.).

Определение ФЭУ:

- Максимальная мощность одной панели (Вт);
- КПД (о.е.);
- Габариты (мм);
- Срок службы по паспорту (г.);
- Цена (р.);
- Максимальная занимаемая площадь (м²).

Определение дизель-генератора:

- Номинальная мощность агрегата (кВт);
- Расход топлива при 75%-ой нагрузке (л/ч);
- Срок службы по паспорту (г.);
- Цена (р.);
- Стоимость одного литра топлива (р./л).

Определение блока батарей:

- Напряжение одного аккумулятора (В);
- Емкость единицы (А*ч);
- Срок службы по паспорту (г.);
- Цена (р.).

На (рис.48) представлен фрагмент кода, содержащий в себе исходные данные.

```
clear all; %Очистка Workspace

%% Ввод исходных данных
Pnomv=30; %Номинальная мощность ВТ
KPDv=0.5; %КПД
Vmin=2.5; %Минимальная скорость ветра
Vnom=9; %Номинальная скорость ветра
Vmax=35; %Критическая скорость ветра
LTv=20; %Срок службы
Price_v=1600000; %Цена
Nmaxv=8; %Ограничение количества

PnomS=150; %Номинальная мощность панели
L1=1482; %Длина модуля
L2=676; %Ширина модуля
KPDs=0.15; %КПД солнечных панелей
LTs=30; %Срок службы
Price_s=7500; %Цена
Smax=500; %Ограничение площади солнечных батарей

Pdg=100; %Номинальная мощность ДГ
FC=21; %Расход топлива при 75%-ой нагрузке
LTdg=10; %Срок службы
Price_dg=485000; %Цена
FuelCost=35; %Стоимость литра топлива

Ub=12; %Напряжение аккумулятора
Cb=200; %Емкость аккумулятора
UseCap=0.7; %Часть используемой емкости
Price_b=25344; %Цена
LTb=10; %Срок службы

% Чтение Excel:
Pl=xlswread('Load.xls',1,'A4:X4'); %График нагрузок
Gh=(xlswread('Solar.xlsm',1,'C130:Z141'))./1000; %Инсоляция
Vw=xlswread('Wind.xlsm',2,'C63:Z74'); %Скорость ветра
```

Рис. 48 – Фрагмент кода. Исходные данные

Далее необходимо обработать некоторые исходные данные и получить расчетные параметры (рис.49).

```
Wl=sum(P1);           %99 за сутки
Wdg=Pdg*24;          %99 ДГ за сутки
S=L1*L2/10^6;         %Расчет площади одного солнечного модуля
Nmaxs=Smax/S;        %Пересчет ограничения из площади в кол-во
Pnomv=Pnomv*KPDv;     %Учет КПД ветроустановки
Pb=(UseCap*Ub*Cb/1000); %Расчет мощности одного аккумулятора
```

Рис. 49 – Фрагмент кода. Обработка исходных данных

На (рис.49) представлены следующие расчеты:

Кол-во электроэнергии, потребленной нагрузкой в течение суток, (кВт*ч):

$$Wl = \sum_{n=1}^{24} Pl_n, \text{ где } Pl_n - \text{мощность нагрузки в } n\text{-ный час суток, (кВт).}$$

Энергия дизель-генератора за сутки:

$$Wdg = Pdg \cdot 24, \text{ где } Pdg - \text{мощность дизель-генератора, (кВт*ч).}$$

Площадь одного солнечного модуля (м²):

$$S = \frac{L1 \cdot L2}{10^6}, \text{ где } L1, L2 - \text{габариты модуля, (мм).}$$

Ограничение использования солнечных модулей, (шт.):

$$N_{maxs} = \frac{S_{max}}{S}, \text{ где } S_{max}, S - \text{ограничение площади и единичная площадь соответственно, (м}^2\text{).}$$

Учет КПД ветроустановки с переобозначением переменной:

$$Pnomv = Pnomv \cdot KPDv, \text{ где } Pnomv - \text{мощность единичной ВЭУ (кВт).}$$

Расчет мощности одного аккумулятора, (кВт):

$P_b = \frac{UseCap \cdot Ub \cdot Cb}{10^3}$, где $UseCap$ – допустимый процент разрядки аккумулятора, (о.е.); Ub – напряжение одной батареи, (В); Cb – емкость одной батареи, (А*ч).

3.3 Расчет генерации ВИЭ

После ввода и обработки исходных данных переходим к расчету генерации единичных ВИЭ. На (рис.50) представлен фрагмент кода программы, описывающий данный расчет.

```
WvET=0;
WsET=0;

for i=1:12
    j=1;
    for j=1:24
        if (Vw(i,j) >= Vmin && Vw(i,j) < Vnom)
            WvET=WvET+30*Pnomv*(Vw(i,j).^3/(Vnom^3-Vmin^3)-Vmin^3/(Vnom^3-Vmin^3));
        elseif (Vw(i,j) >= Vnom && Vw(i,j) < Vmax)
            WvET=WvET+30*Pnomv;
        end
        Wsh=(KPDs*S*Gh(i,j));
        if Wsh <= Pnoms/1000
            WsET=WsET+30*Wsh;
        else
            WsET=WsET+30*Pnoms;
        end
    end
end
```

Рис. 50 – Фрагмент кода. Расчет генерации единичных ВИЭ

Необходимо определить годовую выработку ЭЭ одной ветроустановкой и одним солнечным модулем. Расчет ведется по принципу суммирования энергии, выработанным каждым источником за каждый час среднего дня каждого месяца. Объявлены два цикла «for», один внутри другого, которые переключают месяц и средний день месяца соответственно.

Примечание: здесь и далее во всем коде программы переменная «i» означает номер месяца (1-ый месяц – декабрь), переменная «j» означает текущий час.

ВЭУ задается кусочной функцией [см.п.2.2.1], где

W_{vET} – суммарная энергия, выработанная эталонной ветровой установкой, (кВт);

$V_w(i, j)$ – скорость ветра в j-ый час среднего дня i-того месяца.

Следует отметить, что полученная ежечасная мощность умножается на 30 – количество дней в месяце.

ФЭУ задается линейной зависимостью [см.п.2.2.1].

W_{sET} – суммарная энергия, выработанная эталонным солнечным модулем, (кВт);

Алгоритм предусматривает ограничение выработки ЭЭ одним солнечным элементом, основываясь на его паспортной максимальной мощности. В связи с этим, каждый час проверяется, не превышает ли выработанная часовая энергия лимит, установленный в исходных данных (переменная W_{sh}). Если лимит не превышен, то вычисление часовой энергии происходит согласно линейной функциональной зависимости, в противном случае ограничивается паспортной максимальной мощностью. Так же, как и в случае с ВЭУ, происходит умножение на 30 дней, но уже не часовой энергии, а суточной.

3.4 Расчет удельных затрат

После определения реальной годовой энергии необходимо рассчитать ее стоимость, выгодность использования тех или иных источников относительно других. На (рис.51) представлен фрагмент кода программы, содержащий данный расчет.

```
Cud_s=Price_s/LTs/WsET;  
Cud_v=Price_v/LTv/WvET;  
Cud_dg=FC/(0.75*Pdg)*FuelCost+Price_dg/(0.75*Pdg*8760*LTdg);
```

Рис. 51 – Фрагмент кода. Расчет удельных затрат

Затраты вычислены приблизительно, с учетом только основных составляющих. Для ФЭУ определяется стоимость существования солнечной панели за год и полученные годовые затраты распределяются на каждый киловатт-час вырабатываемой за год электроэнергии:

$$Cud_s = \frac{Price_s}{LTs \cdot WsET}, \text{ где}$$

Cud_s – удельные годовые затраты на использование одного солнечного модуля (р./кВтч);

$Price_s$ – цена одного солнечного модуля (р.);

LTs – срок службы по паспорту (г.).

Для ВЭУ расчет аналогичен вышеприведенному:

$$Cud_v = \frac{Price_v}{LTv \cdot WvET}$$

Учет дизель-генератора состоит из двух частей: стоимость агрегата и затраты на топливо. Расход топлива приводится при 75%-ой нагрузке. Годовая

$$Cud_dg = \frac{FC}{0.75 \cdot Pdg} + \frac{Price_dg}{0.75 \cdot Pdg \cdot 8760 \cdot LTdg}, \text{ где}$$

FC – Fuel Consumption, затраты на топливо, (р./л);

$Price_{dg}$ – цена агрегата (p.);

$LTdg$ – срок службы (г.).

3.5 Формирование целевой функции

Вводится целевая функция затрат, которая в дальнейшем подвергнется минимизации. Процесс оптимизации будет проводится для каждого среднего дня, т.е. 12 раз. Предварительно необходимо для каждого случая рассчитать вырабатываемую ветротурбиной и солнечным модулем энергию. Данный процесс схож с представленным в (см.п.3.3), поэтому будет представлен только фрагмент кода (рис.52).

```
i=1;
for i=1:12
    Wv=0;
    Ws=0;
        j=1;
        for j=1:24

            if (Vw(i,j) >= Vmin && Vw(i,j) < Vnom)

                Wv=Wv+Pnomv* (Vw(i,j) .^3/ (Vnom^3-Vmin^3)-Vmin^3/ (Vnom^3-Vmin^3));

            elseif (Vw(i,j) >= Vnom && Vw(i,j) < Vmax)

                Wv=Wv+Pnomv;

            end

        end

    end

    Ws=(KPDs*1*sum(Gh(i,:)));
```

Рис. 52 – Фрагмент кода. Расчет энергии ВИЭ для каждого среднего дня

Для оптимизации будет применено штатное средство (решатель) программы Matlab – «intlinprog» – целочисленное линейное программирование. На официальном сайте программы приведена короткая справка по данной функции [15]. На (рис.53) указаны входные параметры решателя.

$$\min_x f^T x \text{ subject to } \begin{cases} x(\text{intcon}) \text{ are integers} \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub. \end{cases}$$

Рис. 53 – Входные параметры решателя

Следует дать пояснения к (рис.53). На нем изображена система ограничений, содержащая в себе переменные, которые нужно объявить до вызова решателя.

«x» – вектор искоемых переменных, т.е. решатель способен оптимизировать функцию относительно нескольких переменных;

«intcon» – вектор, который определяет, какие из искоемых переменных должны быть целыми числами.

Далее следуют различного рода ограничения. Т.к. искомые переменные являются вектором, параметры «A», «Aeq» – матрицы, ведь для каждого неизвестного может существовать более одного ограничения каждого вида.

Определяем целевую функцию:

$$f(N) = \text{Cud}_s \cdot N(1) \cdot W_s + \text{Cud}_w \cdot N(2) \cdot W_v + \text{Cud}_{dg} \cdot N(3), \text{ где}$$

N – вектор искоемых переменных:

$N(1)$ – первый элемент вектора, кол-во солнечных панелей (шт.);

$N(2)$ – второй элемент вектора, кол-во ветроустановок (шт.);

$N(3)$ – третий элемент вектора, энергия, взятая от ДГ (шт.);

W_s – среднедневная энергия одной эталонной солнечной панели;

W_v – среднедневная энергия одной эталонной ветротурбины;

$\text{Cud}_s, \text{Cud}_w, \text{Cud}_{dg}$ – соответствующие удельные затраты.

Затем описываем ограничения:

$$\begin{cases} N(1), N(2), N(3) \geq 0 \\ N(1) \leq N_{\max s} \\ N(2) \leq N_{\max v} \\ N(3) \leq W_{dg} \\ N(1) \cdot W_s + N(2) \cdot W_v + N(3) = W_l \end{cases}$$

В связи с тем, что процесс минимизации происходит 12 раз с переобозначением переменных (в том числе и найденных значений), создано средство запоминания необходимой информации на каждом цикле пересчета.

На (рис.54) представлен фрагмент кода, содержащий в себе вышеуказанные действия.

```
N=zeros(3,1);           %Определяем вектор искомых значений как нулевой
lb=[0,0,0];             %Количество неотрицательно
ub=[Nmaxs,Nmaxv,Wdg];   %Верхний лимит для каждого неизвестного

%   Баланс мощности:
%   N(1)*Ws+N(2)*Wv+N(3)*Wdg=Wl

Aeq=zeros(1,3);         %Определение нулевой матрицы ограничения:
                        %одно ограничение с тремя переменными
Aeq(1,[1,2,3])=[Ws,Wv,1]; %Заполнение матрицы коэффициентами
beq(1,1)=Wl;

%   Составление целевой функции затрат:
%   f(N)=Cud_s*N(1)*Ws+Cud_w*N(2)*Wv+Cud_dg*N(3)

f(1)=Cud_s*Ws;          %Коэффициенты при искомым переменных
f(2)=Cud_v*Wv;
f(3)=Cud_dg;
intcon=[1,2];           %Количество фЗУ и фЗУ целое

%   Запрет вывода служебной информации:
options = optimoptions('intlinprog','Display','off');

%   Вызывается решатель:
[N, fval]=intlinprog(f,intcon,[],[],Aeq,beq,lb,ub,options);

%   Создание годовых векторов найденных среднесуточных значений:
FF(i)=round(fval);       %Вектор затрат
Ns(i)=N(1);              %Кол-во фЗУ
Nv(i)=N(2);              %Кол-во ВЗУ
WdgUse(i)=N(3);          %Кол-во ЭЭ ДГ
```

Рис. 54 – Фрагмент кода. Процесс минимизации целевой функции для каждого среднего дня

3.6 Определение количества аккумулируемой энергии

На данном этапе мы имеем количество и мощности солнечных модулей и ветротурбин, рекомендованных к установке, а также прогнозируемое использование мощностей дизель-генератора. Поскольку погодные условия предсказуемы только статистически и далеко не всегда в наличии имеются рассчитанные мощности ВИЭ, невозможно назвать точное число аккумуляторов, необходимых и достаточных для бесперебойного электроснабжения нагрузки. Для гарантированного обеспечения нагрузки электроэнергией предлагается следующий метод расчета кол-ва батарей.

Сначала следует сформировать матрицу небаланса: почасово определить дефицит (или профицит) энергии за каждый средний день. Определяется доступная суммарная почасовая энергия всех ФЭУ и ВЭУ, затем от полученного значения отнимается необходимая в данный час нагрузке энергия. На (рис.55) представлен фрагмент кода, содержащий в себе данный процесс. В качестве наглядного примера, на (рис.56) изображен график дефицита энергии в апреле.

```

for j=1:24

Ps(i,j)=KPDs*S*Ns(i)*Gh(i,j);           % ЭЭ солнечных батарей каждого часа

%Кусочная функция для нахождения ЭЭ ВТ каждого часа:
if (Vw(i,j) >= Vmin && Vw(i,j) < Vnom)

Pv(i,j)=Nv(i)*Pnomv*(Vw(i,j).^3/(Vnom^3-Vmin^3)-Vmin^3/(Vnom^3-Vmin^3));

elseif (Vw(i,j) >= Vnom && Vw(i,j) < Vmax)

Pv(i,j)=Nv(i)*Pnomv;

else

Pv(i,j)=0;

end

Delta(i,j)=Ps(i,j)+Pv(i,j)-Pl(j);       %Составление матрицы небаланса

end

```

Рис. 55 – Фрагмент кода. Составление матрицы небаланса

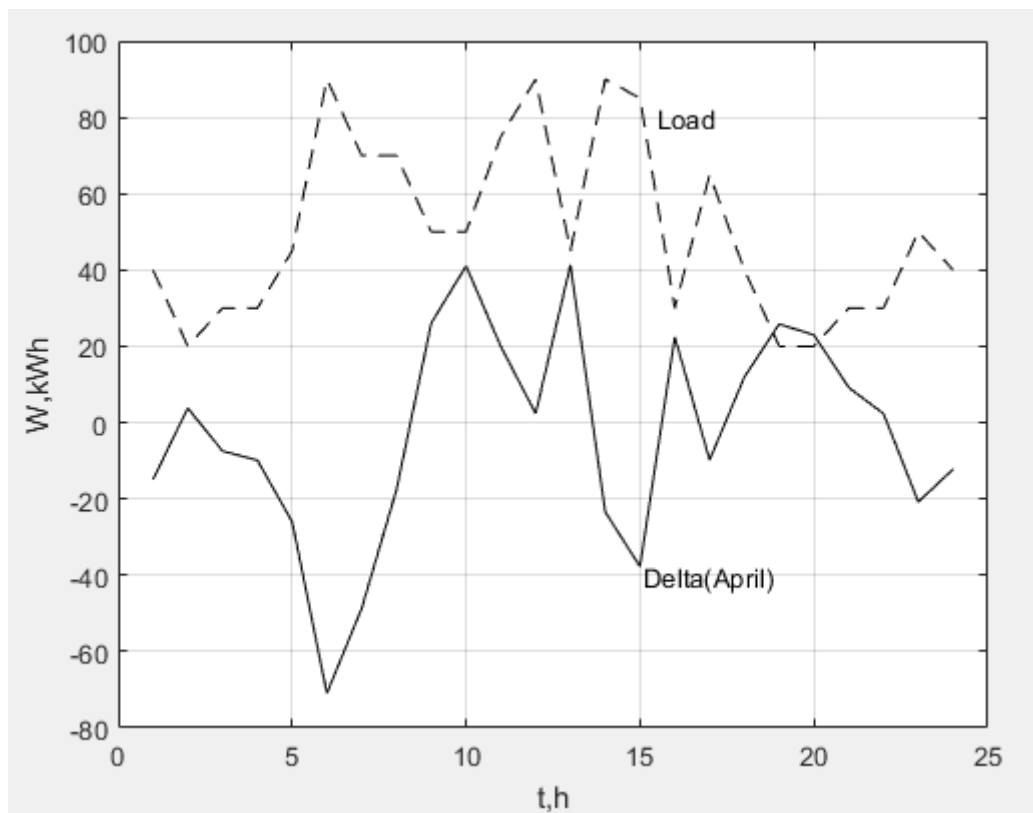


Рис. 56 – Матрица небаланса для апреля

Из полученной матрицы нужно исключить профицит энергии и анализировать только дефицитные часы. После проведения минимизации функции затрат, для каждого среднего дня будет указано предполагаемое использование мощностей дизель-генератора, следовательно, необходимо погасить наиболее дефицитные часы этой энергией. Когда вся предполагаемая энергия ДГ будет использована, подсчитывается оставшийся суммарный дефицит энергии за день. Это количество энергии и должны покрыть блоки аккумуляторных батарей.

Определив энергию, которую должны обеспечить батареи, необходимо рассчитать их количество и подсчитать затраты:

$$Nb = \frac{Wb}{Pb}, \text{ где}$$

Wb – суммарный дефицит;

Pb – мощность одной батареи.

$$Cost_b = Nb \cdot \frac{Price_b}{LTb \cdot 365}, \text{ где}$$

$Cost_b$ – приведенные к одним суткам затраты на устанавливаемое кол-во аккумуляторов;

Nb – кол-во аккумуляторов;

$Price_b$ – цена одной батареи;

LTb – паспортный срок службы.

3.7 Структурирование и вывод результатов

На (рис.57) приведен фрагмент кода, описывающий вывод результатов.

```

Ss=ceil(Ns*S);    %Площадь, занимаемая всеми солнечными панелями
FF=FF+Cost_b;    %Суммирование оптимизированных затрат с затратами на батареи
WdgUse=round(WdgUse);    %Округление

%Оформление и вывод результатов в виде таблицы:
Month={'Dec';'Jan';'Feb';'Mar';'Apr';'May';'Jun';'Jul';'Aug';'Sep';'Oct';'Nov'};
T=table(Ns,Ss,Nv,Nb,WdgUse,FF,'RowNames',Month);
T.Properties.VariableNames = {'Ns' 'S' 'Nv' 'Nb' 'W_dg' 'SumCost'};
disp(T);

```

Рис. 57 – Фрагмент кода. Структурирование и вывод результата

Код программы в целом виде с комментариями представлен в [Приложении В].

Выводы по главе 3

В данном разделе был представлен и реализован алгоритм оптимизации выбора оборудования. В качестве критерия оптимизации был принят минимум затрат целевой функции. Программа позволяет определить необходимый и достаточный набор оборудования для бесперебойного обеспечения потребителей энергией, при этом выбранная конфигурация сопровождается минимумом затрат на ее установку.

Входными параметрами в программу являются реальные метеорологические данные о солнечной инсоляции на горизонтальную поверхность и скорости ветра в заданном регионе, а также паспортные данные эталонного оборудования, которое подлежит легкому масштабированию.

Выходными параметрами из программы являются количество тех или иных эталонных единиц оборудования, рекомендуемых к установке в каждый из месяцев, а также сопутствующие затраты на все предложенные варианты.

Любой из полученных вариантов конфигурации сети подлежит проверке моделированием для подтверждения стабильной работы системы с такими параметрами.

Глава 4. Выбор оборудования гибридной системы электроснабжения для конкретного заданного объекта

Применим разработанные программу оптимизации и модель для выбора оборудования гибридной СЭС, рассматривая конкретный заданный объект.

Местоположение гибридной электростанции – Приморский край.

Нагрузку определим, основываясь на статистическом графике нагрузок децентрализованных потребителей [16, табл. 3.3]. Так как график задан в относительных единицах, приведем его к именованным, приняв максимальную полную мощность равной 80 кВт. После расчетов имеем график нагрузок, представленный на (рис.58).

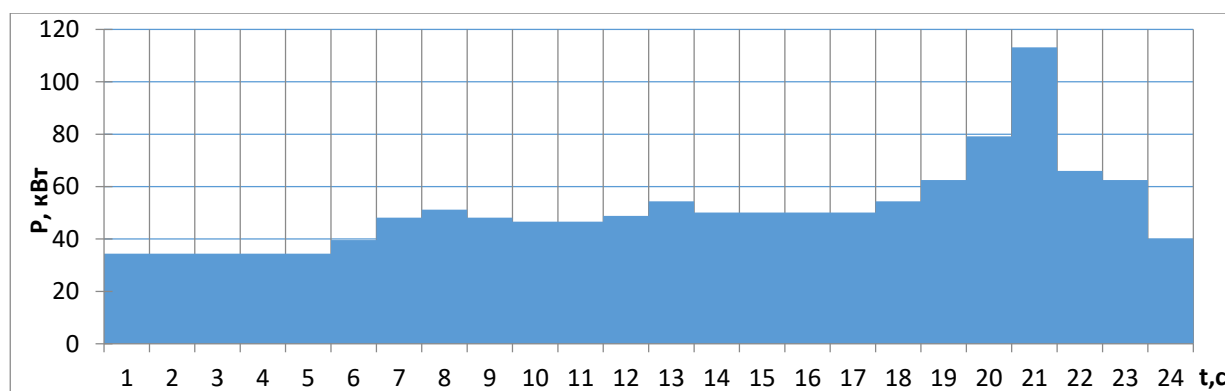


Рис. 58 – График нагрузок децентрализованного потребителя

В качестве эталонных единиц принято следующее оборудование:

- Ветрогенератор "AL TERRA - Skyline" - 30 кВт [17];
- Солнечная батарея SilaSolar 150Вт [18];
- Аккумулятор Delta GX 12-200 [19];
- Дизель генератор АД-100-T400-1P (Weichai) [20].

Метеорологические данные приняты для административного центра Приморского края – г.Владивостока (см.п.).

На (рис.59) представлен результат работы программы оптимизации.

	Ns	S	Nv	Nb	W_dg	SumCost
Dec	4343	4351	0	503	0	3559
Jan	3718	3725	0	519	0	3672
Feb	2520	2525	0	528	0	3734
Mar	1852	1856	0	528	1	3738
Apr	1666	1670	0	524	0	3704
May	1545	1548	0	511	0	3618
Jun	1581	1584	0	508	0	3597
Jul	1907	1911	0	517	1	3662
Aug	1959	1963	0	525	0	3715
Sep	2039	2043	0	520	0	3679
Oct	2587	2592	0	510	0	3609
Nov	3630	3637	0	500	0	3541

Рис. 59 – Результат работы программы оптимизации

Принятые обозначения:

Ns – количество эталонных солнечных панелей (шт.);

S – занимаемая солнечными панелями площадь (м^2);

Nv – количество эталонных ветротурбин (шт.);

Nb – количество эталонных АКБ (шт.);

W_dg – энергия, вырабатываемая ДГ (кВтч);

SumCost – удельные среднесуточные затраты (р.).

Из решения программы следует, что самым выгодным вариантом является использование только солнечной энергетики как самой дешевой, но не всегда имеется возможность выделить под солнечные модули территории размером несколько квадратных километров, поэтому принудительно вводится ограничение на занимаемую солнечными модулями площадь, к примеру, 800 м^2 . Программа запускается заново с установленным ограничением, на (рис.60) представлен результат.

	Ns	S	Nv	Nb	W_dg	SumCost
	—	—	—	—	—	—
Dec	665	667	9	108	0	3368
Jan	561	563	9	122	0	3471
Feb	743	745	9	163	0	3324
Mar	798	800	9	211	10	3320
Apr	762	764	7	228	0	3287
May	731	733	7	224	1	3212
Jun	782	784	9	231	0	3193
Jul	794	796	9	203	0	3238
Aug	742	744	12	183	0	3211
Sep	794	796	13	204	0	3322
Oct	693	695	10	132	0	3189
Nov	631	633	9	123	0	3410

Рис. 60 – Результат работы программы с ограничением площади ФЭУ

Предлагается ввести ограничение по количеству ветротурбин – 9 шт. Результаты расчета представлены на (рис.61).

	Ns	S	Nv	Nb	W_dg	SumCost
	—	—	—	—	—	—
Dec	665	667	9	108	0	3368
Jan	561	563	9	122	0	3471
Feb	743	745	9	163	0	3324
Mar	798	800	9	211	10	3320
Apr	762	764	7	228	0	3287
May	731	733	7	224	1	3212
Jun	782	784	9	231	0	3193
Jul	794	796	9	203	0	3238
Aug	798	800	9	226	157	4577
Sep	798	800	9	274	230	5496
Oct	798	800	9	139	40	3412
Nov	631	633	9	123	0	3410

Рис. 61– Результат работы программы с ограничениями ФЭУ и ВЭУ

В результатах отображены оптимальные параметры элементов схемы для каждого месяца. Принятие окончательного решения о будущей конфигурации оборудования возлагается на инженера-проектировщика.

Принимаются следующие параметры сети:

- Занимаемая солнечными модулями площадь равна 800 м²;

- Количество эталонных ветротурбин равно 9 шт.;
- Количество АКБ равно 224 шт.

Для проверки работоспособности схемы с заданными параметрами в модель вносятся значения и запускается расчет. На (рис.62) представлены результаты моделирования для марта.

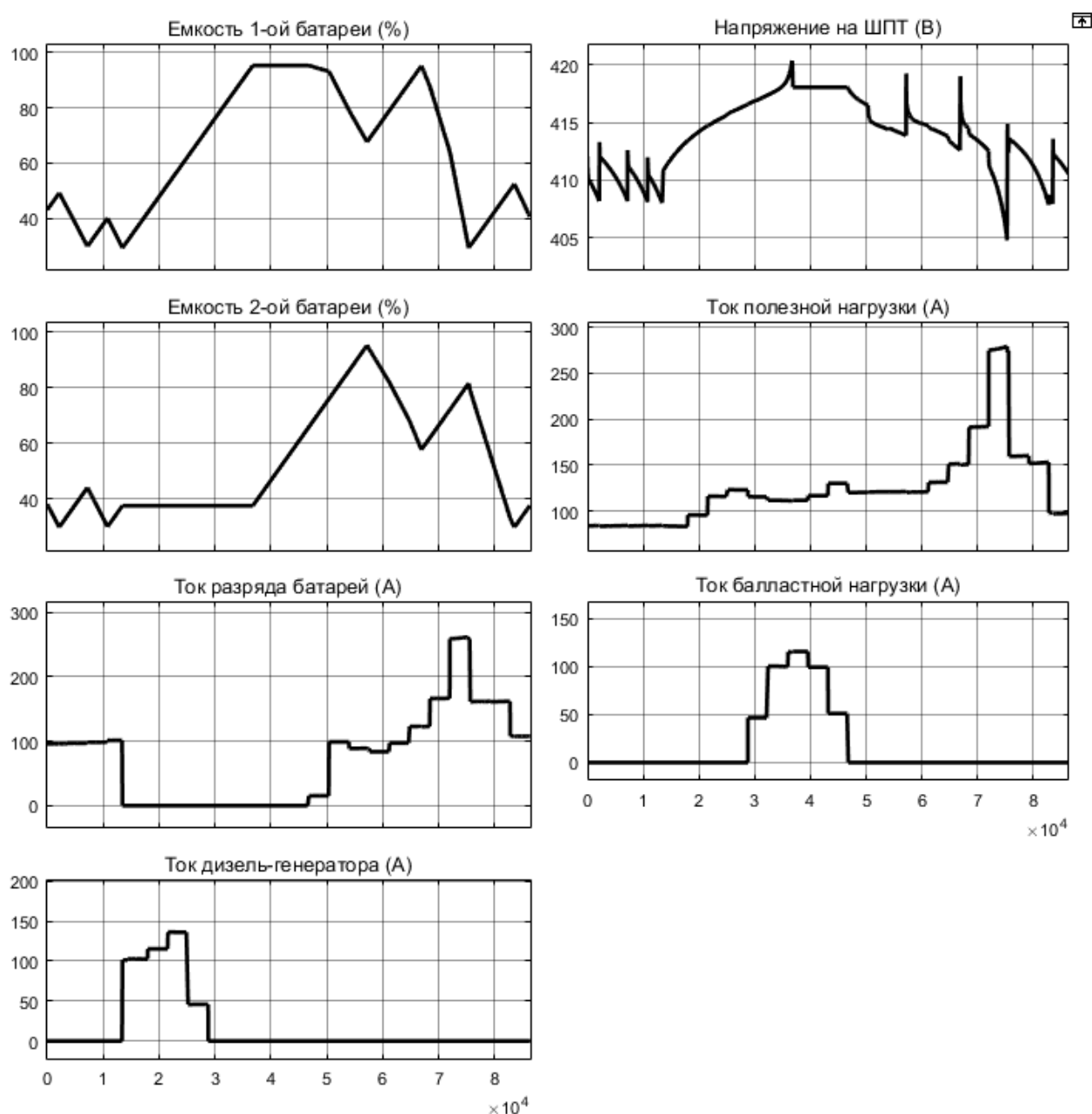


Рис. 62 – Осциллограммы, отображающие суточный процесс работы схемы

Анализируя осциллограммы (рис.62) следует сделать вывод, что все компоненты системы работают правильно, а именно: график нагрузок полностью

обеспечен энергией, блоки батарей по мере разряда/заряда переключаются между собой. В часы нехватки запасенной энергии и энергии ВИЭ запускается ДГ и заряжает один из блоков батарей, в моменты профицита возобновляемой энергии подключается балластная нагрузка. Напряжение на ШПТ равно 410 ± 10 (В), что является допустимым. Моделирование подтвердило работоспособность гибридной СЭС с заданными параметрами.

Выводы по главе 4

В данной главе представлены результаты использования разработанной программы оптимизации выбора оборудования и спрогнозированы процессы, протекающие при работе гибридной автономной электростанции с заданными параметрами. Определены рекомендованные параметры конфигурации автономной СЭС децентрализованного потребителя в Приморском крае.

Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является проведение научного исследования, составление сметы затрат, определение ресурсосберегающей эффективности и оценка важности рисков.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- изучение конкурирующих продуктов
- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научного исследования.

5.1 Изучение конкурирующих продуктов

На сегодняшний день на рынке представлено крайне мало продуктов, пригодных для конкурирования. Все подобные разработки существуют в виде рекомендаций или в виде несостоятельных моделей, которые имеют ряд существенных недостатков. Наиболее конкурентоспособный продукт – программный комплекс HOMER. Предлагается сравнение предлагаемого варианта с данным ПО.

Табл. 4 – Сравнительный анализ вариантов

Предлагаемая модель	ПО HOMER
+ Возможность моделирования с абсолютно любыми исходными параметрами	- Моделирование с исходными параметрами, выбранными из широкого списка
- Жесткая конфигурация сети	+ Гибкая конфигурация сети
+ Редактирование параметров на низком уровне	- Редактирование параметров только на высоком уровне
+ Наблюдение за поведением каждого элемента системы и вывод конечного результата	- Предоставление только конечного результата
- Принятые допущения снижают точность показаний	+ Допущения незначительны, точность высока
- Не проработано взаимодействие с пользователем	+ Удобный интерфейс
+ Не требуется лицензирование	- Требуется лицензирование (500\$ за один некорпоративный ПК)

Таким образом, если требуется готовый, отлаженный продукт, при этом заказчик обладает значительными финансовыми средствами, стоит обратить внимание на ПО HOMER. В случае жестких финансовых ограничений и необходима только оптимизация выбора оборудования, лучше всего подойдет предлагаемая модель.

5.2 Структура работ в рамках проведения научного исследования

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер. Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и произведено распределение исполнителей по видам работ. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей по данным видам работ приведены в таблице 1.

Табл. 5 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работ	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Анализ тематической литературы	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
Теоретические исследования	3	Обоснование и описание основных параметров модели	Инженер, научный руководитель
	4	Обработка метеорологических сведений	Инженер, научный руководитель
	5	Моделирование источников энергии	Инженер, научный руководитель
	6	Моделирование полезной и балластной нагрузок	Инженер, научный руководитель
	7	Моделирование блоков АКБ	Инженер, научный руководитель
	8	Апробация разработанной модели	Инженер, научный руководитель
	9	Разработка алгоритма оптимизации выбора оборудования	Инженер, научный руководитель
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер, научный руководитель
Оформление отчета по НИР	11	Составление отчета по НИР	Инженер
	12	Проверка НИР руководителем	Научный руководитель

5.3 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения работы оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (1)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

В таблице 2 приведена ожидаемая трудоемкость выполнения работ.

Табл. 6 – Определение трудоемкости и длительности выполнения работ

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож\dot{u}}$, чел-дни			
	Науч. рук-ль	Инженер	Науч. рук-ль	Инженер	Науч. рук-ль	Инженер	Науч. рук-ль	Инженер
1.Составление и утверждение технического задания	1	-	2	-	1,4	-	2	-
2.Подбор и изучение материалов по теме	-	8	-	16	-	11,2	-	12
3.Обоснование и описание основных параметров модели	1	3	2	4	1,4	3,4	2	4
4.Обработка метеорологических сведений	3	10	4	15	3,4	12	4	12
5.Моделирование источников энергии	1	5	3	10	1,8	7	2	7
6.Моделирование полезной и балластной нагрузок	1	3	2	5	1,4	3,8	2	4
7.Моделирование блоков АКБ	4	12	8	18	5,6	14,4	6	15
8.Апробация разработанной модели	1	3	2	6	1,4	4,2	2	5
9.Разработка алгоритма оптимизации выбора оборудования	6	15	10	20	7,6	17	8	17
10.Оценка эффективности полученных результатов	1	2	2	4	1,4	2,8	2	3
11.Составление отчета по НИР	-	15	-	20	-	17	-	17
12.Проверка НИР руководителем	3	-	5	-	3,8	-	4	-

Таблица 7 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исполнитель работ	T_{pi} , раб. дн.	Продолжительность выполнения работ									
				Март			Апр.			Май			Июнь
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2										
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	12										
3	Обоснование и описание основных параметров модели	Инженер	4										
		Руководитель	2										
4	Обработка метеорологических сведений	Инженер	12										
		Руководитель	4										
5	Моделирование источников энергии	Инженер	7										
		Руководитель	2										
6	Моделирование полезной и балластной нагрузок	Инженер	4										
		Руководитель	2										
7	Моделирование блоков АКБ	Инженер	15										
		Руководитель	6										

8	Апробация разработанной модели	Инженер	5										
		Руководитель	2										
9	Разработка алгоритма оптимизации	Инженер	17										
		Руководитель	8										
10	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер	3										
		Руководитель	2										
11	Составление отчета по НИР	Инженер	17										
12	Проверка НИР руководителем	Руководитель	4										

5.4 Составление сметы затрат на проведение научного исследования

Величина вознаграждения по проекту складывается из оплаты за выполнение работы, исходя из почасовых расценок ТПУ:

- Доктор наук – 400р/ч;
- Незащищенный специалист – 175р/ч.

При средней трудоемкости 4ч/день для каждого специалиста вознаграждение составит:

$$З_{\text{зн}_{\text{рук}}} = C \cdot \sum T = 4 \cdot 400 \cdot (2 + 2 + 4 + 2 + 2 + 6 + 2 + 8 + 2 + 4) = 54400p$$

$$З_{\text{зн}_{\text{инж}}} = C \cdot \sum T = 4 \cdot 175 \cdot (12 + 4 + 12 + 7 + 4 + 15 + 5 + 17 + 3 + 17) = 67200p$$

Отчисления во внебюджетные фонды по НИР составляет 27,1% от величины вознаграждения:

$$З_{\text{отч}_{\text{рук}}} = 0,271 \cdot З_{\text{зн}_{\text{рук}}} = 0,271 \cdot 54400 = 14743p$$

$$З_{\text{отч}_{\text{инж}}} = 0,271 \cdot З_{\text{зн}_{\text{инж}}} = 0,271 \cdot 67200 = 18212p$$

Суммарные затраты по оплате труда и отчислению во внебюджетные фонды:

$$З_{\text{сумм}_{\text{рук}}} = З_{\text{зн}_{\text{рук}}} + З_{\text{отч}_{\text{рук}}} = 54400 + 14743 = 71686p$$

$$З_{\text{сумм}_{\text{инж}}} = З_{\text{зн}_{\text{инж}}} + З_{\text{отч}_{\text{инж}}} = 67200 + 18212 = 85412p$$

Норма накладных расходов составляет 90% от величины вознаграждения и включает в себя все дополнительные расходы по проекту.

Табл.8 – Определение сметы затрат на НИР

Наименование статьи	Сумма, тыс.руб.	Структура затрат, %
1.Составление и утверждение технического задания	2640	1
2.Подбор и изучение материалов по теме	7920	3
3.Обоснование и описание основных параметров модели	5280	2
4.Обработка метеорологических сведений	13200	5
5.Моделирование источников энергии	7920	3
6.Моделирование полезной и балластной нагрузок	5280	2
7.Моделирование блоков АКБ	21120	8
8.Апробация разработанной модели	7920	3
9.Разработка алгоритма оптимизации выбора оборудования	23760	9
10.Оценка эффективности полученных результатов	5280	2
11.Составление отчета по НИР	13200	5
12.Проверка НИР руководителем	5280	2
Отчисления во внебюджетные фонды	34320	13
Накладные расходы	110880	42
Итого	264000	100

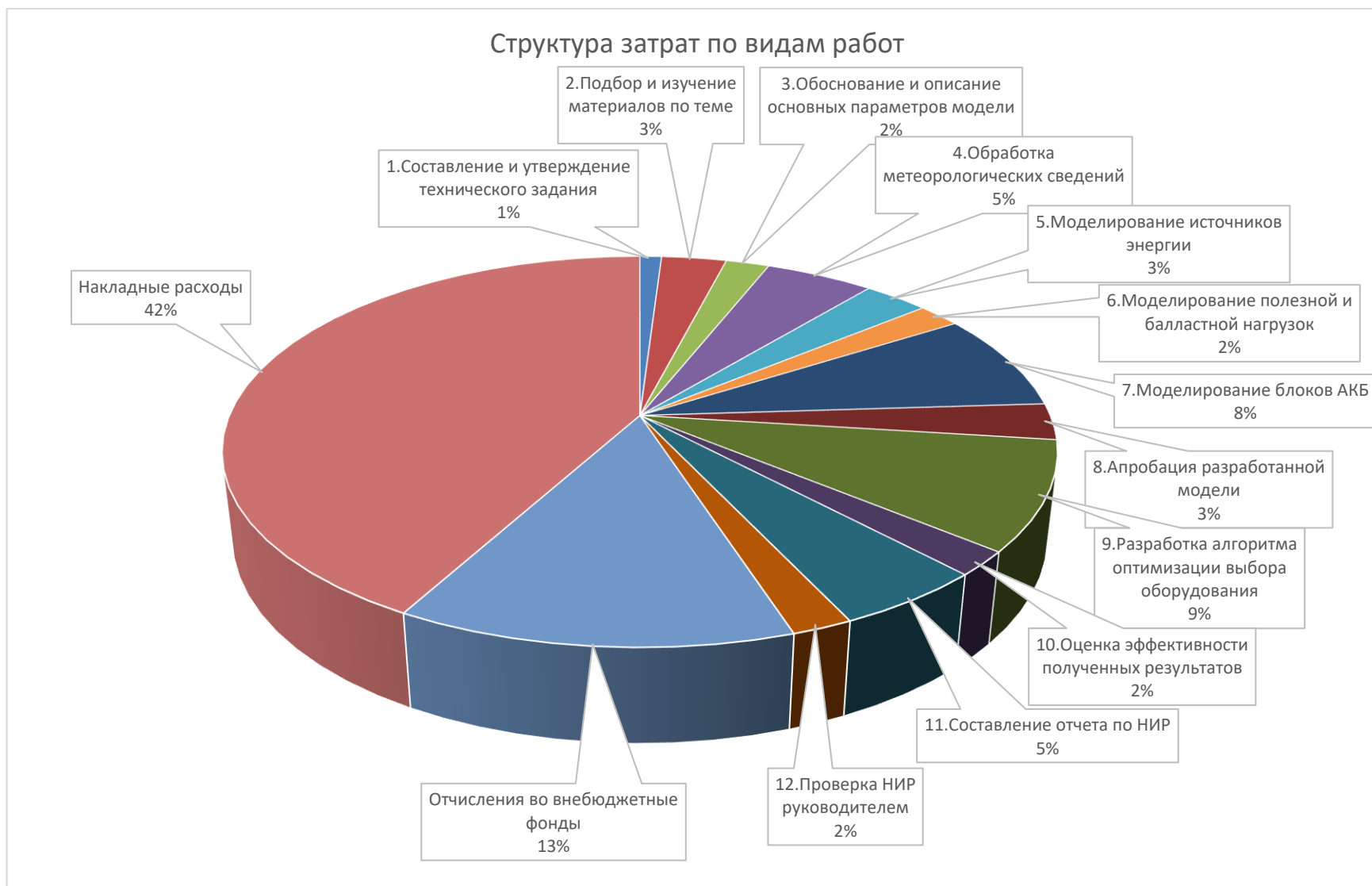


Рис. 63 – Структура затрат по видам работ

5.5 Оценка важности рисков

При оценке важности рисков оценивается вероятность их наступления (P_i). По шкале от 0 до 100 процентов: 100 – наступит точно, 75 – скорее всего наступит, 50 – ситуация неопределенности, 25 – риск скорее всего не наступит, 0 – риск не наступит. Оценка важности риска оценивается весовым коэффициентом (w_i). Важность оценивается по 10- балльной шкале b_i .

Табл. 9 – Возможные риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i * w_i$
1	Инфляция	100	1	0,024	2,4
2	Непредвиденные расходы в плане работ	25	2	0,049	1,225
3	Снижение размера оплаты	25	6	0,146	3,65
4	Отказ заказчика от оплаты	25	8	0,195	4,875
5	Риск невозможности усовершенствования технологии	50	4	0,098	4,9
6	Развитие конкурентных технологий	75	7	0,171	12,825
7	Отсутствие результата в установленные сроки	25	5	0,122	3,05
8	Получение отрицательного результата при внедрении в производство	25	8	0,195	4,875
	Сумма		41	1	37,8

Итоговая оценка риска исследования составила порядка 40%, т.е. работа имеет право на жизнь, хотя и не лишен препятствий.

Выводы по главе 5.

В результате выполнения поставленных задач по данному разделу, можно сделать следующие выводы:

- при планировании работ по проведению научного исследования был разработан график занятости для исполнителей проекта, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оценить и лучше спланировать рабочее время исполнителей.
- составление сметы на проведение научного исследования позволило оценить первоначальный бюджет затрат на реализацию научного исследования, а также дать рекомендации по оптимизации этих затрат.
- оценка риска проекта составила порядка 40%, что считается приемлемым. Для того чтобы избежать риски или минимизировать их воздействие на проект необходимо проводить мероприятия по борьбе с рисками.

Заключение

В данной работе была разработана модель гибридной системы электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии, таких как солнце и ветер.

Из всех рассмотренных схем СЭС за основу была принята схема с использованием ШПТ. В этом случае не требуется согласование режимов работы ВИЭ между собой – возможен выбор обособленных систем автоматического управления для каждой генерирующей установки. Данная система легко масштабируема: допускается изменение количества и номиналов тех или иных устройств без особого влияния на основную конструкцию схемы.

С помощью разработанной модели становится возможным наблюдение за поведением каждого из элементов схемы, во время ее работы. На ШПТ сопрягаются три вида источников энергии, две нагрузки (полезная и балластная) и пара блоков аккумуляторных батарей. Расчет модели проводился с использованием только постоянного тока и при этом не был нарушен основной физический закон – баланс мощности. Такое допущение позволило не вводить в модель громоздкие преобразователи, что свело время моделирования к минимуму.

В качестве входных параметров могут выступать любые значения: как произвольные, так и расчетные, с возможностью быстрой замены.

При моделировании ВИЭ были использованы реальные метеорологические данные, описан процесс их обработки и применения к модели.

Модель была апробирована с использованием произвольных входных параметров. Результаты теста показывают, что она работает корректно и готова к применению.

Также был разработан и реализован алгоритм оптимизации выбора оборудования для системы электроснабжения децентрализованного потребителя. В качестве критерия оптимизации был принят минимум затрат целевой функции. Программа позволяет определить необходимый и достаточный набор оборудования для бесперебойного обеспечения потребителей энергией, при этом выбранная конфигурация сопровождается минимумом затрат на ее установку.

Входными параметрами в программу являются реальные метеорологические данные о солнечной инсоляции на горизонтальную поверхность и скорости ветра в заданном регионе, а также паспортные данные эталонного оборудования, которое подлежит легкому масштабированию.

Выходными параметрами из программы являются количество тех или иных эталонных единиц оборудования, рекомендуемых к установке в каждый из месяцев, а также сопутствующие затраты на все предложенные варианты.

Любой из полученных вариантов конфигурации сети подлежит проверке моделированием для подтверждения стабильной работы системы с такими параметрами.

В качестве примера были представлены результаты использования разработанной программы оптимизации выбора оборудования и спрогнозированы процессы, протекающие при работе гибридной автономной электростанции с заданными параметрами. Определены рекомендованные параметры конфигурации автономной СЭС децентрализованного потребителя в Приморском крае.

Список использованной литературы

- 1) Применение буферных накопителей энергии для повышения энергоэффективности ветродизельных электростанций / Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Хошнау З.П. // «Электричество» №6 – 2012 – С. 24-29
- 2) Сравнительный анализ схем построения автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергетики / Обухов С.Г., Плотников И.А. // Промышленная энергетика. - 2012 - №. 7 - С. 46-51
- 3) Hybrid solar and wind power: an essential for information communication technology infrastructure and people in rural communities / L.A. Adejumo, S.G. Oyagbinrin, F. G. Akinboro & M.B. Olajide // IJRRAS 9(1) – October 2011–P.130-138
- 4) Hybrid power generation system / Gagari Deb, Ramananda Paul, and Sudip Das // International Journal of Computer and Electrical Engineering. Vol.4. No. 2. April 2012 – P. 141-144
- 5) Configuration of a standalone hybrid wind-diesel photoelectric unit for guaranteed power supply for mineral resource industry facilities / A.A. Belsky, A.N. Skamyin, E.V. Iakovleva // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11. Number 1 (2016) – P. 233-238
- 6) Optimal Sizing of a Hybrid Grid-Connected Photovoltaic-Wind-Biomass Power System /Arnan Gonzalez, Jordi-Roger Riba and Antoni Rius // Sustainability 2015. 7. P. 12787-12806
- 7) Cost Benefit Analysis of Self-Optimized Hybrid Solar- Wind-Hydro Electrical Energy Supply as compared with HOMER Optimization / A. Amevi, B.H. Essel, B.M. Mathias // International Journal of Computer Applications (0975 - 8887) Vol. 114-No. IS. March 2015 P. 32-38
- 8) A Simple Sizing Optimization Method for Wind- Photovoltaic-Battery Hybrid Renewable Energy Systems / S.M.R. Tito, T.T. Lie, T. Anderson – 2013 P. 8-13
- 9) Simulation and Optimization of Independent Renewable Energy Hybrid System / Anita Gudelj and Maja Krcum // Trans marit. sci. 2013; 01. P. 28-35

- 10) Расписание погоды. Режим доступа: <https://rp5.ru/> свободный (Дата обращения 10.05.2017)
- 11) NASA Surface meteorology and Solar Energy – Location. Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov> свободный (Дата обращения 11.05.2017)
- 12) A Model for Hourly Solar Radiation Data Generation from Daily Solar Radiation Data Using a Generalized Regression Artificial Neural Network / T. Khatib, W. Elmenreich // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy Volume 2015, Article ID 963024, 13 pages
- 13) Владивосток. Википедия. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> свободный (Дата обращения 11.05.2017)
- 14) Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition / J.A. Duffie, W.A. Beckman, 2013 P. 910
- 15) Целочисленное программирование в Matlab. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html> свободный (Дата обращения 02.05.2017)
- 16) Электроснабжение сельского хозяйства / Будзко И. А., Лещинская Т. Б. // Издательство: Колос, 2000
- 17) Ветрогенератор "ALTERRA - Skyline" - 30 кВт. Режим доступа: <http://npk-alterra.com/products/npk-alterra-comvetrogenerator-alterra-skyline-30-kvt> свободный (Дата обращения 12.05.2017)
- 18) Солнечная батарея SilaSolar 150Вт. Режим доступа: <https://e-solarpower.ru/solar/solar-panels/mono-panel/solnechnaya-panel-sila-150vt/> свободный (Дата обращения 12.05.2017)
- 19) Delta GX 12-200. Режим доступа: <https://oporasolar.ru/p143575006-delta-200.html> свободный (Дата обращения 12.05.2017)
- 20) Дизель генератор АД-100-Т400-1Р (Weichai). Режим доступа: <https://ru-tehnika.pro/p471126-dizelnyj-generator-100.html> свободный (Дата обращения 12.05.2017)

Приложение А. Обработка метеорологических данных: скорость ветра

[illegible]

Окончание Приложения А. Обработка метеорологических данных: скорость ветра

Среднесуточные показания по часам

Min 4,61

Max 7,00

	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Dec	6,17	6,15	6,18	6,23	6,25	6,24	6,23	6,22	6,21	6,19	6,18	6,22	6,30	6,33	6,37	6,45	6,49	6,42	6,30	6,23	6,23	6,23	6,24	6,22
Jan	6,05	6,11	6,11	6,11	6,11	6,15	6,24	6,28	6,26	6,24	6,23	6,34	6,56	6,68	6,70	6,74	6,76	6,58	6,22	6,04	5,99	5,90	5,85	5,91
Feb	5,77	5,81	5,76	5,67	5,62	5,67	5,78	5,83	5,79	5,71	5,66	5,85	6,21	6,39	6,40	6,41	6,42	6,27	5,99	5,85	5,80	5,70	5,65	5,69
Mar	5,24	5,22	5,18	5,10	5,06	5,05	5,04	5,03	4,98	4,87	4,82	5,10	5,66	5,94	6,03	6,23	6,33	6,27	6,15	6,09	5,90	5,51	5,31	5,29
Apr	5,48	5,40	5,31	5,13	5,05	5,05	5,06	5,07	5,11	5,21	5,26	5,58	6,23	6,56	6,67	6,89	7,00	6,87	6,60	6,47	6,29	5,92	5,74	5,66
May	5,45	5,32	5,29	5,24	5,21	5,18	5,12	5,09	5,11	5,16	5,18	5,43	5,92	6,17	6,34	6,69	6,86	6,79	6,63	6,56	6,38	6,02	5,84	5,71
Jun	5,42	5,40	5,27	5,02	4,89	4,83	4,71	4,64	4,66	4,71	4,73	4,93	5,35	5,55	5,65	5,85	5,95	5,92	5,86	5,83	5,75	5,58	5,50	5,47
Jul	5,48	5,44	5,34	5,14	5,04	5,06	5,10	5,13	5,14	5,18	5,20	5,33	5,59	5,72	5,86	6,13	6,26	6,21	6,10	6,05	5,94	5,72	5,61	5,57
Aug	5,14	5,06	5,00	4,86	4,80	4,83	4,91	4,95	4,88	4,75	4,68	4,85	5,20	5,37	5,47	5,67	5,76	5,72	5,63	5,59	5,53	5,42	5,37	5,29
Sep	4,66	4,61	4,66	4,75	4,80	4,81	4,82	4,83	4,82	4,81	4,80	4,98	5,33	5,50	5,57	5,71	5,78	5,65	5,38	5,24	5,13	4,90	4,79	4,74
Oct	5,84	5,81	5,79	5,75	5,72	5,68	5,61	5,57	5,52	5,42	5,37	5,49	5,73	5,85	5,93	6,10	6,18	6,11	5,96	5,89	5,89	5,90	5,91	5,88
Nov	6,15	6,16	6,19	6,26	6,30	6,28	6,26	6,25	6,20	6,10	6,04	6,14	6,32	6,42	6,40	6,35	6,33	6,26	6,13	6,06	6,08	6,13	6,15	6,15
Med	5,81	5,82	5,81	5,78	5,76	5,78	5,82	5,84	5,81	5,75	5,72	5,88	6,18	6,33	6,38	6,46	6,50	6,39	6,16	6,05	5,98	5,83	5,76	5,78

Приложение Б. Обработка метеорологических данных: инсоляция на горизонтальную плоскость

TZ	Lat	Long	LSMT
10	43	132	150

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Gd	2,23	3,29	4,45	4,95	5,31	5,21	4,34	4,22	4,03	3,16	2,25	1,89	

Day	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344												
Delta	-20,9	-13	-2,4	9,4	18,8	23,1	21,2	13,5	2,2	-9,6	-18,9	-23												
ωs	1,07	1,02	1,00	1,01	1,05	1,08	1,07	1,03	1,00	1,01	1,05	1,08												
B	-1,10	-0,59	-0,10	0,41	0,93	1,39	2,01	2,53	3,05	3,56	4,08	4,53												
EoT	-10,03	-14,54	-9,36	-0,24	3,76	0,61	-5,77	-3,97	5,50	14,86	15,07	6,43												
LST	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
AST																								
Jan	2,03	3,03	4,03	5,03	6,03	7,03	8,03	9,03	10,03	11,03	12,03	13,03	14,03	15,03	16,03	17,03	18,03	19,03	20,03	21,03	22,03	23,03	24,03	25,03
Feb	1,96	2,96	3,96	4,96	5,96	6,96	7,96	8,96	9,96	10,96	11,96	12,96	13,96	14,96	15,96	16,96	17,96	18,96	19,96	20,96	21,96	22,96	23,96	24,96
Mar	2,04	3,04	4,04	5,04	6,04	7,04	8,04	9,04	10,04	11,04	12,04	13,04	14,04	15,04	16,04	17,04	18,04	19,04	20,04	21,04	22,04	23,04	24,04	25,04
Apr	2,20	3,20	4,20	5,20	6,20	7,20	8,20	9,20	10,20	11,20	12,20	13,20	14,20	15,20	16,20	17,20	18,20	19,20	20,20	21,20	22,20	23,20	24,20	25,20
May	2,26	3,26	4,26	5,26	6,26	7,26	8,26	9,26	10,26	11,26	12,26	13,26	14,26	15,26	16,26	17,26	18,26	19,26	20,26	21,26	22,26	23,26	24,26	25,26
Jun	2,21	3,21	4,21	5,21	6,21	7,21	8,21	9,21	10,21	11,21	12,21	13,21	14,21	15,21	16,21	17,21	18,21	19,21	20,21	21,21	22,21	23,21	24,21	25,21
Jul	2,10	3,10	4,10	5,10	6,10	7,10	8,10	9,10	10,10	11,10	12,10	13,10	14,10	15,10	16,10	17,10	18,10	19,10	20,10	21,10	22,10	23,10	24,10	25,10
Aug	2,13	3,13	4,13	5,13	6,13	7,13	8,13	9,13	10,13	11,13	12,13	13,13	14,13	15,13	16,13	17,13	18,13	19,13	20,13	21,13	22,13	23,13	24,13	25,13
Sep	2,29	3,29	4,29	5,29	6,29	7,29	8,29	9,29	10,29	11,29	12,29	13,29	14,29	15,29	16,29	17,29	18,29	19,29	20,29	21,29	22,29	23,29	24,29	25,29
Oct	2,45	3,45	4,45	5,45	6,45	7,45	8,45	9,45	10,45	11,45	12,45	13,45	14,45	15,45	16,45	17,45	18,45	19,45	20,45	21,45	22,45	23,45	24,45	25,45
Nov	2,45	3,45	4,45	5,45	6,45	7,45	8,45	9,45	10,45	11,45	12,45	13,45	14,45	15,45	16,45	17,45	18,45	19,45	20,45	21,45	22,45	23,45	24,45	25,45
Dec	2,31	3,31	4,31	5,31	6,31	7,31	8,31	9,31	10,31	11,31	12,31	13,31	14,31	15,31	16,31	17,31	18,31	19,31	20,31	21,31	22,31	23,31	24,31	25,31

Продолжение Приложения Б. Обработка метеорологических данных: инсоляция на горизонтальную плоскость

ω	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Jan	-149,51	-134,51	-119,51	-104,51	-89,51	-74,51	-59,51	-44,51	-29,51	-14,51	0,49	15,49	30,49	45,49	60,49	75,49	90,49	105,49	120,49	135,49	150,49	165,49	180,49	195,49
Feb	-150,63	-135,63	-120,63	-105,63	-90,63	-75,63	-60,63	-45,63	-30,63	-15,63	-0,63	14,37	29,37	44,37	59,37	74,37	89,37	104,37	119,37	134,37	149,37	164,37	179,37	194,37
Mar	-149,34	-134,34	-119,34	-104,34	-89,34	-74,34	-59,34	-44,34	-29,34	-14,34	0,66	15,66	30,66	45,66	60,66	75,66	90,66	105,66	120,66	135,66	150,66	165,66	180,66	195,66
Apr	-147,06	-132,06	-117,06	-102,06	-87,06	-72,06	-57,06	-42,06	-27,06	-12,06	2,94	17,94	32,94	47,94	62,94	77,94	92,94	107,94	122,94	137,94	152,94	167,94	182,94	197,94
May	-146,06	-131,06	-116,06	-101,06	-86,06	-71,06	-56,06	-41,06	-26,06	-11,06	3,94	18,94	33,94	48,94	63,94	78,94	93,94	108,94	123,94	138,94	153,94	168,94	183,94	198,94
Jun	-146,85	-131,85	-116,85	-101,85	-86,85	-71,85	-56,85	-41,85	-26,85	-11,85	3,15	18,15	33,15	48,15	63,15	78,15	93,15	108,15	123,15	138,15	153,15	168,15	183,15	198,15
Jul	-148,44	-133,44	-118,44	-103,44	-88,44	-73,44	-58,44	-43,44	-28,44	-13,44	1,56	16,56	31,56	46,56	61,56	76,56	91,56	106,56	121,56	136,56	151,56	166,56	181,56	196,56
Aug	-147,99	-132,99	-117,99	-102,99	-87,99	-72,99	-57,99	-42,99	-27,99	-12,99	2,01	17,01	32,01	47,01	62,01	77,01	92,01	107,01	122,01	137,01	152,01	167,01	182,01	197,01
Sep	-145,63	-130,63	-115,63	-100,63	-85,63	-70,63	-55,63	-40,63	-25,63	-10,63	4,37	19,37	34,37	49,37	64,37	79,37	94,37	109,37	124,37	139,37	154,37	169,37	184,37	199,37
Oct	-143,29	-128,29	-113,29	-98,29	-83,29	-68,29	-53,29	-38,29	-23,29	-8,29	6,71	21,71	36,71	51,71	66,71	81,71	96,71	111,71	126,71	141,71	156,71	171,71	186,71	201,71
Nov	-143,23	-128,23	-113,23	-98,23	-83,23	-68,23	-53,23	-38,23	-23,23	-8,23	6,77	21,77	36,77	51,77	66,77	81,77	96,77	111,77	126,77	141,77	156,77	171,77	186,77	201,77
Dec	-145,39	-130,39	-115,39	-100,39	-85,39	-70,39	-55,39	-40,39	-25,39	-10,39	4,61	19,61	34,61	49,61	64,61	79,61	94,61	109,61	124,61	139,61	154,61	169,61	184,61	199,61

Окночание Приложения Б. Обработка метеорологических данных: инсоляция на горизонтальную плоскость

Gh:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Jan	-1088	-958	-790	-594	-384	-175	20	186	314	393	419	389	307	177	8	-188	-398	-607	-802	-968	-1095	-1175	-1200	-1171
	0	0	0	0	0	0	20	186	314	393	419	389	307	177	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Feb	-1865	-1655	-1380	-1058	-712	-365	-40	240	456	593	643	601	471	261	-14	-336	-682	-1029	-1354	-1634	-1850	-1987	-2037	-1995
	0	0	0	0	0	0	0	240	456	593	643	601	471	261	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mar	-2702	-2390	-1987	-1520	-1019	-521	-57	339	641	828	888	817	619	307	-96	-564	-1064	-1563	-2026	-2422	-2724	-2911	-2971	-2900
	0	0	0	0	0	0	0	339	641	828	888	817	619	307	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apr	-2849	-2497	-2050	-1538	-996	-462	28	442	750	932	975	877	643	291	-157	-668	-1210	-1744	-2235	-2648	-2956	-3138	-3181	-3083
	0	0	0	0	0	0	28	442	750	932	975	877	643	291	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
May	-2651	-2306	-1870	-1375	-854	-342	126	518	806	973	1005	902	669	323	-112	-607	-1129	-1641	-2108	-2500	-2789	-2955	-2988	-2884
	0	0	0	0	0	0	126	518	806	973	1005	902	669	323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jun	-2357	-2050	-1660	-1215	-745	-281	144	502	768	924	960	873	669	361	-28	-473	-944	-1407	-1833	-2190	-2457	-2613	-2649	-2561
	0	0	0	0	0	0	144	502	768	924	960	873	669	361	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jul	-2088	-1830	-1499	-1117	-711	-307	67	384	624	770	813	748	582	324	-7	-389	-796	-1200	-1573	-1890	-2130	-2277	-2319	-2255
	0	0	0	0	0	0	67	384	624	770	813	748	582	324	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aug	-2336	-2052	-1689	-1271	-827	-386	20	364	623	779	822	748	563	279	-84	-502	-946	-1386	-1792	-2137	-2396	-2552	-2595	-2521
	0	0	0	0	0	0	20	364	623	779	822	748	563	279	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sep	-2387	-2082	-1700	-1266	-810	-364	43	383	633	775	800	706	499	195	-188	-621	-1077	-1524	-1931	-2271	-2520	-2662	-2687	-2593
	0	0	0	0	0	0	43	383	633	775	800	706	499	195	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oct	-1766	-1524	-1227	-894	-547	-212	90	339	516	610	615	530	361	119	-178	-511	-858	-1193	-1496	-1744	-1921	-2015	-2020	-1935
	0	0	0	0	0	0	90	339	516	610	615	530	361	119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nov	-1097	-943	-753	-540	-319	-105	88	246	359	419	422	367	259	105	-85	-298	-519	-733	-926	-1084	-1197	-1257	-1259	-1205
	0	0	0	0	0	0	88	246	359	419	422	367	259	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dec	-848	-733	-589	-426	-255	-87	66	193	286	339	347	311	233	118	-26	-189	-360	-528	-681	-808	-901	-954	-962	-926
	0	0	0	0	0	0	66	193	286	339	347	311	233	118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Приложение В. Исходный код программы

```

clear all; %Очистка Workspace

%% Ввод исходных данных
Pnomv=30; %Номинальная мощность ВТ
KPDv=0.5; %КПД
Vmin=2.5; %Минимальная скорость ветра
Vnom=9; %Номинальная скорость ветра
Vmax=35; %Критическая скорость ветра
LTv=20; %Срок службы
Price_v=1600000; %Цена
Nmaxv=8; %Ограничение количества

Pnoms=150; %Номинальная мощность панели
L1=1482; %Длина модуля
L2=676; %Ширина модуля
KPDs=0.15; %КПД солнечных панелей
LTs=30; %Срок службы
Price_s=7500; %Цена
Smax=500; %Ограничение площади солнечных батарей

Pdg=100; %Номинальная мощность ДГ
FC=21; %Расход топлива при 75%-ой нагрузке
LTdg=10; %Срок службы
Price_dg=485000; %Цена
FuelCost=35; %Стоимость литра топлива

Ub=12; %Напряжение аккумулятора
Cb=200; %Емкость аккумулятора
UseCap=0.7; %Часть используемой емкости
Price_b=25344; %Цена
LTb=10; %Срок службы

% Чтение Excel:
Pl=xlsread('Load.xls',1,'A4:X4'); %График нагрузок
Gh=(xlsread('Solar.xlsm',1,'C130:Z141'))./1000; %Инсоляция
Vw=xlsread('Wind.xlsm',2,'C63:Z74'); %Скорость ветра

Wl=sum(Pl); %ЭЭ за сутки
Wdg=Pdg*24; %ЭЭ ДГ за сутки
S=L1*L2/10^6; %Расчет площади одного солнечного модуля
Nmaxs=Smax/S; %Пересчет ограничения из площади в кол-во
Pnomv=Pnomv*KPDv; %Учет КПД ветроустановки
Pb=(UseCap*Ub*Cb/1000); %Расчет мощности одного аккумулятора

%% Определение удельных затрат

WvET=0;
WsET=0;

for i=1:12
    j=1;
    for j=1:24

        if (Vw(i,j) >= Vmin && Vw(i,j) < Vnom)

            WvET=WvET+30*Pnomv*(Vw(i,j).^3/(Vnom^3-Vmin^3)-Vmin^3/(Vnom^3-
Vmin^3));

```

Продолжение Приложения В. Исходный код программы

```
elseif (Vw(i,j) >= Vnom && Vw(i,j) < Vmax)

    WvET=WvET+30*Pnomv;

end

Wsh=(KPDs*S*Gh(i,j));

if Wsh <= Pnoms/1000

    WsET=WsET+30*Wsh;

else

    WsET=WsET+30*Pnoms;

end

end

end

Cud_s=Price_s/LTs/WsET;
Cud_v=Price_v/LTv/WvET;
Cud_dg=FC/(0.75*Pdg)*FuelCost+Price_dg/(0.75*Pdg*8760*LTdg);

%%          Служебная информация: определение переменных перед циклом
как нулевые матрицы
%          размером 24x12 (24 часа, 12 месяцев,
выбран средний день месяца)
Ps=zeros(size(Gh));
Pv=zeros(size(Gh));
Delta=zeros(size(Gh));
Nb=zeros(1,12);
Cost_b=zeros(1,12);
FF=zeros(1,12);
%%          Алгоритм оптимизации: вводится цикл пересчета 12-и средних
дней

i=1;
for i=1:12

    Wv=0;
    Ws=0;

    j=1;
    for j=1:24

        if (Vw(i,j) >= Vmin && Vw(i,j) < Vnom)

            Wv=Wv+Pnomv*(Vw(i,j).^3/(Vnom^3-Vmin^3)-Vmin^3/(Vnom^3-Vmin^3));

            elseif (Vw(i,j) >= Vnom && Vw(i,j) < Vmax)

                Wv=Wv+Pnomv;

        end

    end

end
```

Продолжение Приложения В. Исходный код программы

```

Ws=(KPDs*1*sum(Gh(i,:)));

%           Определение и минимизация целевой функции минимума затрат

N=zeros(3,1);           %Определяем вектор искомых значений как нулевой
lb=[0,0,0];             %Количество неотрицательно
ub=[Nmaxs,Nmaxv,Wdg];   %Верхний лимит для каждого неизвестного

%   Баланс мощности:
%   N(1)*Ws+N(2)*Wv+N(3)*Wdg=Wl

Aeq=zeros(1,3);         %Определение нулевой матрицы ограничения:
                        %одно ограничение с тремя переменными
Aeq(1,[1,2,3])=[Ws,Wv,1]; %Заполнение матрицы коэффициентами
beq(1,1)=Wl;

%   Составление целевой функции затрат:
%   f(N)=Cud_s*N(1)*Ws+Cud_v*N(2)*Wv+Cud_dg*N(3)

f(1)=Cud_s*Ws;          %Коэффициенты при искомых переменных
f(2)=Cud_v*Wv;
f(3)=Cud_dg;
intcon=[1,2];           %Количество ФЭУ и ФЭУ целое

%   Запрет вывода служебной информации:
options = optimoptions('intlinprog','Display','off');

%   Вызывается решатель:
[N, fval]=intlinprog(f,intcon,[],[],Aeq,beq,lb,ub,options);

%   Создание годовых векторов найденных среднесуточных значений:
FF(i)=round(fval);       %Вектор затрат
Ns(i)=N(1);              %Кол-во ФЭУ
Nv(i)=N(2);              %Кол-во ВЭУ
WdgUse(i)=N(3);          %Кол-во ЭЭ ДГ

%           Выбор количества аккумуляторных батарей

%Используется цикл вычисления небаланса энергии на каждом часе текущего
среднего дня

for j=1:24

    Ps(i,j)=KPDs*S*Ns(i)*Gh(i,j);           % ЭЭ солнечных батарей каждого часа

%Кусочная функция для нахождения ЭЭ ВТ каждого часа:
    if (Vw(i,j) >= Vmin && Vw(i,j) < Vnom)

        Pv(i,j)=Nv(i)*Pnomv*(Vw(i,j).^3/(Vnom^3-Vmin^3)-Vmin^3/(Vnom^3-Vmin^3));

    elseif (Vw(i,j) >= Vnom && Vw(i,j) < Vmax)
        Pv(i,j)=Nv(i)*Pnomv;
    else

        Pv(i,j)=0;

    end
end

```

Окончание Приложения В. Исходный код программы

```

Delta(i,j)=Ps(i,j)+Pv(i,j)-Pl(j);      %Составление матрицы небаланса

end

%Производится "заполнение" самых дефицитных часов в возрастающем порядке
энергией ДГ:

WdgSum=WdgUse(i);

while WdgSum>0      %Пока ЭЭ ДГ доступна, выполняется
    rm=zeros(1,1); %Служебная корректировка индекса строки
    cl=zeros(1,1); %Служебная корректировка индекса столбца

    %Поиск индексов элемента, соответствующего самому дефицитному часу
    текущего дня:
    [rm, cl] = find( Delta == min( min(Delta(i,:)) ) );
    rm=rm(1);      %Служебная корректировка индекса строки
    cl=cl(1);      %Служебная корректировка индекса столбца

    if WdgSum >= abs(Delta(rm,cl))      %Если энергии хватает, то
        WdgSum=WdgSum + Delta(rm,cl); %полное "заполнение" найденного часа

    else      %В противном случае заполняется на столько, сколько
энергии есть
        Delta(rm,cl)=Delta(rm,cl)+WdgSum;
        WdgSum=0;      %Энергия дизель-генератора потрачена
    end

end

end

%      Подсчет оставшегося дефицита:

Wb=0;      %Обнулить искомую мощность батарей
j=1;
for j=1:24
    if Delta(i,j)<0 %Если элемент матрицы (час) дефицитный, то

        Wb=Wb+Delta(i,j); %его необходимо восполнить энергией батарей
    end
end

Nb(i)=round(-Wb/Pb);      %Округленное до целого кол-во батарей
Cost_b(i)=round(Nb(i)*Price_b/LTb/365); %Затраты на это количество

end

%%      Структурирование и вывод результатов

Ss=ceil(Ns*S); %Площадь, занимаемая всеми солнечными панелями
FF=FF+Cost_b;  %Суммирование оптимизированных затрат с затратами на батареи
WdgUse=round(WdgUse); %Округление

%Оформление и вывод результатов в виде таблицы:
Month={'Dec';'Jan';'Feb';'Mar';'Apr';'May';'Jun';'Jul';'Aug';'Sep';'Oct';'Nov';
''};
T=table(Ns,'Ss','Nv','Nb','WdgUse','FF','RowNames',Month);
T.Properties.VariableNames = {'Ns' 'S' 'Nv' 'Nb' 'W_dg' 'SumCost'};
disp(T);

```