На правах рукописи

Карамов Дмитрий Николаевич

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ И НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор **Клер Александр Матвеевич**
Официальные оппоненты:	**Лукутин Борис Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО НИ Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт, кафедра Электроснабжение промышленных предприятий, профессор **Зубова Наталья Владиславовна**, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), кафедра Систем электроснабжения предприятий, доцент
Ведущая организация	ФГБУН Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва

Защита состоится «30» июня 2016 года в 13 00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте: sei.irk.ru/dissert/case.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____2016 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 003.017.01, **Клер Александр Матвеевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В восточных и северных регионах РФ сосредоточено большое количество децентрализованных систем электроснабжения (ДСЭС), не имеющих электрической связи с районными энергетическими системами. Так, только в Республике Якутия имеется около 130 ДСЭС с суммарной установленной мощностью генерирующих устройств 210 МВт. Для электроснабжения ДСЭС, как правило, используются дизель-генераторные установки (ДГУ) разной установленной мощности, совокупность которых образует дизельную электростанцию (ДЭС). ДЭС свойственна высокая стоимость дизельного топлива, обусловленная дальностью его транспортировки, ограниченностью сроков сезонного завоза, многозвенностью схемы поставок. Транспортная составляющая стоимости топлива у таких потребителей может достигать 50–70%, что приводит к высокой стоимости электроэнергии ДЭС.

Российский и зарубежный опыт показывает, что комбинированное применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и аккумуляторных батарей (АБ) вместе с традиционными энергетическими установками в ДСЭС является экономически эффективным способом энергообеспечения потребителей. В сравнении с ДЭС комбинированное применение ВИЭ и накопителей энергии значительно сокращает потребление дизельного топлива, увеличивает надежность системы, снижается стоимость произведенной единицы электроэнергии.

Необходимо отметить значительный вклад таких ученых, работающих в области возобновляемой энергетики, как: *Н.И. Воропай, З. Стычинский, Л.Б. Директор, О.С. Попель, П.П. Безруких, Б.В. Лукутин, В.В. Елистратов, С.Г. Обухов, В.Г. Николаев, И.Л. Майков, И.Ю. Иванова, О.В Марченко, С.В. Соломин, Т.Ф. Тугузова, G. Rauschenbach, Rodolfo Dufo-López, José L. Bernal-Agustín, J.A. Carta, Orhan Ekren, Tremblay O, A. Hina Fathima, Jonas Allegrini, J. Dekker, Minna Ranjeva, V. Salas, M. P. Musgrove, E. Dursun и многих других*. В их работах предложены подходы к учету стохастического характера генерируемой мощности ветроэнергетических, фотоэлектрических установок, приведены критерии экономической эффективности ВИЭ, разработаны математические модели

различных генерирующих источников на основе ВИЭ. Однако, некоторые научные проблемы, связанные с комбинированным применением ВИЭ, остались не решенными или требуют более тщательной проработки. В частности, недостаточно полно, с точки зрения диссертанта, учитываются: корреляция между такими параметрами окружающей среды, как скорость ветра, температура и давление наружного воздуха, поглощение солнечных лучей за счет облачности (интенсивность солнечного излучения); возможная динамика изменения указанных параметров (случайный характер продолжительности интервалов времени, в течение которых параметры окружающей среды могут находиться в некоторых пределах); режимы работы электротехнического оборудования ДСЭС и капиталовложения в это оборудование; надежность электроснабжения потребителей.

Целью настоящей диссертационной работы является создание методики оптимизации структуры и параметров ДСЭС, использующих ВИЭ, ДЭС, АБ, сетевые инверторы (СИН), батарейные инверторы (БИН), а также элементы трансформирования, передачи и распределения электроэнергии, позволяющей более детально учитывать корреляцию между параметрами окружающей среды, динамику этих параметров, режимы работы электротехнического оборудования ДСЭС, надежность электроснабжения потребителей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие промежуточные задачи.

- Разработана методика комплексной оптимизации ДСЭС, использующих ВИЭ, ДЭС, АБ, СИН, БИН, а также элементы трансформирования, передачи и распределения электроэнергии, основанная на расчетах режимов работы ДСЭС на протяжении всего расчетного периода с шагом один час.
- На основе анализа описанных в литературе математических моделей элементов ДСЭС проведен отбор таких моделей, которые в наибольшей мере соответствуют требованиям решаемых в диссертации оптимизационных задач.
- Сформулированы требования к выбору АБ и учету срока их службы.

•Разработаны и реализованы основные принципы оптимального распределения нагрузок между генерирующими агрегатами, базирующиеся на системе логических условий.

•Предложен и реализован подход к учету надежности электроснабжения потребителей при решении задачи оптимизации состава оборудования ДСЭС, использующих ВИЭ и АБ.

•Создан программно-вычислительный комплекс (ПВК), осуществляющий оптимизацию состава оборудования ДСЭС, основанную на методе покоординатного спуска.

•В рамках ПВК разработана подсистема, формирующая массивы параметров окружающей среды для расчетного периода задачи оптимизации на основе данных, полученных от ближайшей к ДСЭС автоматической метеостанции.

Научную новизну составляют **и выносятся на защиту** следующие **положения:**

•Методика комплексной оптимизации ДСЭС, позволяющая учесть корреляцию между параметрами окружающей среды (скорость ветра, облачность, давление, температура воздуха и т.д.), а также их динамику за счет использования результатов многолетних наблюдений автоматических метеостанций.

•Подход к проведению расчетов электрических режимов при оптимизации ДСЭС, использующих ВИЭ и АБ, позволяющий выбрать элементы трансформации, преобразования, распределения, передачи электроэнергии и определить периодичность замен АБ.

•Метод учета надежности электроснабжения потребителей при решении задачи комплексной оптимизации ДСЭС, основанный на имитации функционирования ДСЭС на протяжении расчетного периода, позволяющий учесть периодичности плановых ремонтов и технических обслуживаний, их продолжительности, параметры потока отказов отдельных элементов ДСЭС.

•Программно-вычислительный комплекс оптимизации состава оборудования ДСЭС, разработанный на базе методических результатов диссертационной работы.

Практическая значимость работы состоит в возможности достаточно корректно на базе многолетних замеров параметров окружающей среды автоматическими метеостанциями оценить экономическую эффективность различных вариантов оборудования ДСЭС, найти оптимальный состав оборудования, определить показатели надежности электроснабжения потребителей ДСЭС. Эффективность разработанного ПВК обеспечивает удобство работы пользователя и оперативность проведения оптимизационных исследований.

Личный вклад автора.

Все результаты, вынесенные на защиту, получены лично автором. Основные положения методики оптимизации состава оборудования ДСЭС на основе возобновляемых источников и накопителей энергии обсуждались с научным руководителем.

Публикации и апробация работы. Результаты, полученные в рамках данной диссертационной работы, опубликованы в шести печатных работах (из них три работы входят в список изданий, рекомендованный Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки России (ВАК)).

Полученные результаты и выводы проделанной работы неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях.

- XLIII-XLV Конференция-конкурс научной молодежи «Системные исследования в энергетике» (Иркутск, 2013 – 2016 гг.);
- III Международная конференция «Возобновляемая энергетика на Дальнем Востоке России» (Якутск, 2015 г.);
- Всероссийская конференция «Энергетика России в XXI веке, инновационное развитие и управление» (Иркутск, 2015 г.);
- Международный конгресс «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность» (Москва, 2015).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, заключения, списка используемой литературы и приложений. Общий объем - 152 страницы, в том числе 38 рисунков и 44 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность данной диссертационной работы, сформулированы цели, приведена научная новизна, практическая значимость работы и личный вклад автора. Представлены основные положения диссертации.

В первой главе рассматриваются проблемы использования ВИЭ в ДСЭС России, реализованные проекты, прогнозы ввода генерирующих мощностей, использующих ВИЭ. Подробно представлены подходы для описания параметров окружающей среды (скорость ветра, интенсивность солнечного излучения, облачность и т.д.), применяемые для решения задачи оптимизации состава оборудования ДСЭС. Показаны различные модели генерирующих устройств, использующих ВИЭ, их детализация и применимость для оптимизационных задач. Представлены наиболее известные методы оптимизации структуры и параметров автономных энергокомплексов, использующих ВИЭ и АБ.

Рассмотрены известные ПВК (*HOMER, HOGA, HYPORA*) оптимизации ДСЭС, использующих ВИЭ, перечислены их преимущества и недостатки.

Сформулированы основные цели и постановка данной диссертационной работы.

Во **второй главе** приводится разработанная диссертантом методика комплексной оптимизации ДСЭС, использующих ВИЭ и АБ.

Наиболее универсальными видами возобновляемой энергии являются ветровая и солнечная. Мощность электрогенераторов, использующих эти виды возобновляемой энергии, имеет стохастический характер, связанный со случайными изменениями скорости ветра, облачности и других параметров окружающей среды. Кроме того, мощность солнечных энергоустановок в ночное время равна нулю.

В этих условиях эффективно применение в ДСЭС АБ, позволяющих приблизить график выдачи мощности от ВИЭ к графику нагрузки потребителей.

Для учета случайного характера скорости ветра и других параметров окружающей среды во многих работах используются различные законы распределения вероятностей, параметры которых подбираются на основе анализа

статистики метеонаблюдений. Применение такого подхода при расчетах режимов функционирования ДСЭС позволяет обоснованно проводить их оптимизацию при использовании одного из двух указанных видов возобновляемой энергетики без использования АБ.

Однако при рассмотрении сочетания ВЭУ и ФЭП, а также АБ необходимо удовлетворить следующие требования.

1. Учесть корреляцию между скоростью ветра, облачностью, давлением и другими параметрами окружающей среды.
2. Учесть случайный характер продолжительности временных отрезков, на протяжении которых различные метеопараметры остаются в пределах некоторых границ.

Учет первого требования необходим для корректной оценки ожидаемой суммарной генерируемой мощности ВЭУ и ФЭП. Учет второго требования необходим для оценки ожидаемой продолжительности отрезков времени с различным, в том числе, низким уровнем генерируемой мощности от ВИЭ и правильного выбора установленной емкости АБ.

Имеющиеся в настоящее время вероятностные зависимости, полученные в результате обработки метеонаблюдений, для большинства регионов не позволяют учесть указанные требования. Единственная реальная возможность такого учета состоит в непосредственном использовании в расчетах ДСЭС результатов метеонаблюдений автоматических метеостанций. Такие станции в последние десятилетия появились даже в весьма отдаленных населенных пунктах РФ. Они проводят синхронные замеры основных параметров окружающей среды (облачности, скорости ветра, давления и др.) с шагом, равным, как правило, трем часам. Для большинства метеостанций продолжительность периода наблюдений в настоящее время составляет не менее 8 лет.

Модель ДСЭС состоит из элементов генерации (ФЭП, ВЭУ, ДГУ), трансформации (ТР), преобразования (СИН, БИН), передачи (ВЛ) и аккумулирования (АБ) электроэнергии. На рисунке 1 представлена используемая в диссертации структурная схема ДСЭС.

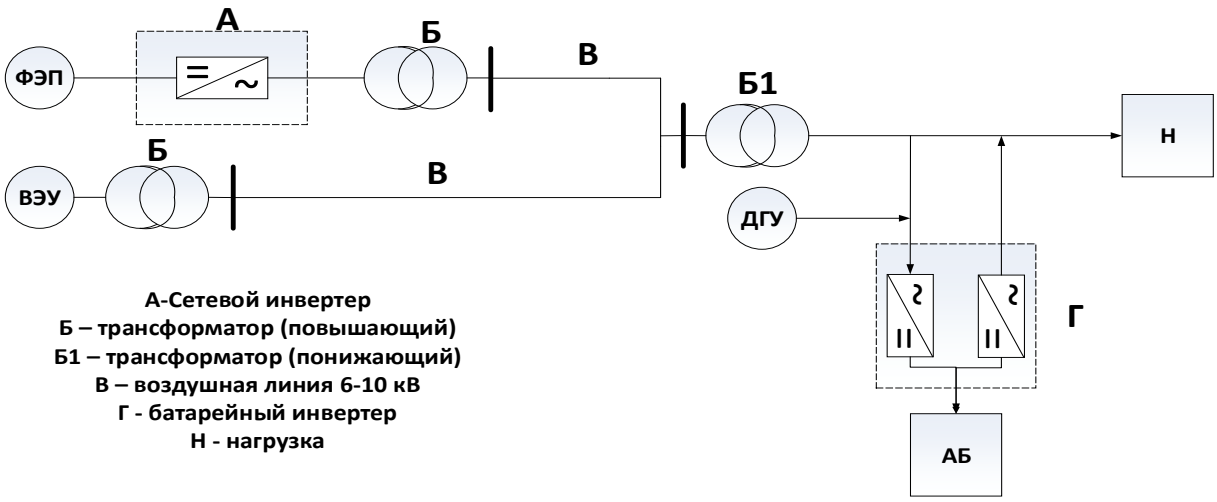

Рисунок 1 - Структурная схема ДСЭС, использующей ВИЭ, а также элементы трансформации, преобразования, передачи и аккумулирования электроэнергии

При моделировании элементов генерации и аккумулирования электроэнергии применяются математические модели, описанные *Hans. S Rauschenbach, Peter Musgrove, Rodolfo Dufo-López, Tremblay O.*

Моделирование элементов силовой электроники выполняется с использованием методик, описанных в работах *Hassaine, E.Salas.*

При определении *функции интенсивности солнечного излучения* используются достаточно известные способы описания основных астрономических параметров Солнца на рассматриваемой территории, представленные в работах - *P.I. Cooper, F. Kasten, J. Radosavljević, A.B. Meinel.*

Расчеты рассматриваемого состава оборудования ДСЭС проводятся с шагом один час для всех лет периода метеонаблюдений, полученных от ближайшей к ДСЭС автоматической метеостанции. При этом параметры окружающей среды принимаются равными значениям, замеренным на соответствующем трехчасовом интервале рассматриваемого года. Расчеты проводятся при ожидаемых графиках нагрузки потребителей.

Основной задачей, решаемой для каждого часа расчетного периода, является задача распределения нагрузок между электрогенерирующими установками ДСЭС. При этом используются следующие правила.

1. Для соответствующего часа и года периода метеонаблюдений определяется (исходя из текущих параметров окружающей среды и астрономических параметров

Солнца) потенциально-возможная выработка электроэнергии ФЭП и ВЭУ (при их заданной установленной мощности).

2. Определяются потери активной мощности при передачи потенциально-возможной выработки ФЭП и ВЭУ до потребителя.

3. Если поступающая к потребителю суммарная мощность ФЭП и ВЭУ не меньше текущей нагрузки потребителя, то вся она покрывается за счет ВИЭ.

4. Если наблюдается избыток мощности, то он поступает на заряд накопителей (АБ). В случае, когда накопители уже заряжены полностью, то на соответствующую величину сокращается мощность ВИЭ. Причем в первую очередь сокращается генерируемая мощность ВЭУ (как наиболее изнашивающихся при работе), а затем ФЭП.

5. Если суммарная мощность ВИЭ меньше нагрузки потребителей, то недостаток мощности покрывается за счет накопителей.

6. Если накопители разряжены (заряд 20% от номинального), то включается необходимое число ДГУ, причем они включаются на полную мощность и отключаются при достижении зарядом накопителя некоторого порогового значения (например, 50% от номинального).

7. Если мощность ДЭС совместно с ВИЭ при разряженном накопителе меньше нагрузки потребителя, то имеет место недоотпуск электроэнергии.

8. По известному заряду накопителя в начале рассчитываемого часа работы ДСЭС и режиму его работы на протяжении этого часа определяется заряд накопителя в конце часа.

9. По генерируемой мощности ДЭС определяется часовой расход топлива.

Распределение нагрузки проводится для каждого часа расчетного периода. Затем определяются среднегодовые показатели (расход топлива, выработка электроэнергии ДЭС, ВЭУ и ФЭП, прямое электроснабжение потребителя и заряд АБ от ДЭС, ВЭУ, ФЭП.

Для сравнения вариантов применяется методика уравновешенной стоимости электроэнергии (Levelized cost of electricity; LCOE) - *K. Branker, C. Kost*.

В соответствии с этой методикой минимизируется целевая функция следующего вида.

$$\mathrm{LCOE} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{К_i + И_i + В_i + И^{э}_{зам.АБ}}{(1+k)^i}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{W_i}{(1+k)^i}}, \quad (1)$$

где $К_i$ – капиталовложения, $И_i$ – условно постоянные эксплуатационные издержки, $В_i$ – топливные издержки, W_i – поступление электроэнергии потребителям, k – коэффициент дисконтирования, n – число лет расчетного периода; подстрочным индексом i обозначены величины, относящиеся к i-ому году расчетного периода, $И^{э}_{зам.АБ}$ – суммарные эксплуатационные издержки на замену АБ с учетом дисконтирования.

В целом задача комплексной оптимизации ДСЭС на базе ВИЭ и АБ может быть сформулирована следующим образом.

В качестве независимых оптимизируемых параметров принимаются: установленные мощности ВЭУ (или число ВЭУ заданного типоразмера); установленные мощности ФЭП (или число модулей ФЭП с заданной площадью); суммарная емкость АБ (или число блоков АБ, при заданном типоразмере АБ и их числе в блоке). Установленная мощность ДЭС принимается из требования, чтобы при выходе из строя одной ДГУ остальные обеспечивали максимальное электропотребление. Это условие продиктовано требованием надежного электроснабжения, и при заданном типоразмере ДГУ позволяет однозначно выбрать число агрегатов ДЭС. Выбор всех сетевых элементов (ТР, проводников ВЛ, СИН, БИН) производится, исходя из заданной установленной мощности ВЭУ, максимальной, с учетом географических координат ДСЭС, мощности ФЭП, суммарной емкости АБ.

Выбор всего оборудования ДСЭС позволяет определить капиталовложения в систему.

Расчет режимов работы, определение потребления дизельного топлива и числа замен АБ производится для рядов метеопараметров, соответствующих каждому году метеонаблюдений. Для всех лет принимается равная вероятность

реализации. Если есть информация о том, что годы с различным суммарным ветропотенциалом имеют разную вероятность реализации, расчеты среднегодовых показателей (или их математических ожиданий) могут проводиться с учетом этих вероятностей. В начальный момент времени заряд АБ принимается равным максимальной емкости АБ. Если в конце года заряд АБ будет ниже максимальной емкости, то учитывается дополнительный расход топлива на ДЭС, необходимый для выработки электроэнергии, которая была «бесплатно» внесена в систему (разность заряда АБ в начале года и в его конце).

Для режимов работы ДСЭС в каждом году метеонаблюдений определяется суммарный объем электроэнергии, идущий в течение года на заряд АБ. Затем, зная энергию заряда за один цикл заряд/разряд, можно определить число циклов за год, зная предельное число циклов, можно определить число лет по истечению которых должна проводиться замена АБ. С учетом стоимости АБ можно определить издержки на замену АБ за весь расчетный период.

После расчетов годовых режимов работы для всех лет метеонаблюдений определяются среднегодовые показатели (расход топлива, число замен АБ), и находится критерий экономической эффективности.

Задача оптимизации состоит в нахождении такого сочетания независимых оптимизационных параметров, при котором критерий эффективности достигает минимального значения.

Математическая постановка задачи оптимизации ДСЭС.

Задача оптимизации формулируется следующим образом.

$$\min \mathrm{LCOE}\left(\mathrm{K}, \mathrm{И}_{\text{уп}}, \mathrm{И}^{\text{ср}}_{\text{Тп}}, \mathrm{И}^{\text{э}}_{\text{зам.АБ}}, \mathrm{P}^{\text{фэп}}_{\text{уст}}, \mathrm{P}^{\text{вэу}}_{\text{уст}}, \mathrm{W}^{\text{АБ}}_{\text{уст}}\right), \tag{2}$$

при условиях

$$x^{\text{у}}_{\text{сеть}} = f_{\text{сеть}}\left(\mathrm{P}^{\text{фэп}}_{\text{уст}}, \mathrm{P}^{\text{вэу}}_{\text{уст}}, \mathrm{W}^{\text{АБ}}_{\text{уст}}, y^{\mathrm{L}}_{\text{сеть}}\right). \tag{3}$$

$$\mathrm{P}^{\text{дэс}}_{\text{уст}} = f_{\text{диз}}\left(\mathrm{P}^{\max}_{\text{нагр}}, \mathrm{P}^{\text{дгу}}_{\text{уст}}\right). \tag{4}$$

$$\mathrm{K} = \mathcal{F}_{\text{к}}\left(\mathrm{P}^{\text{фэп}}_{\text{уст}}, \mathrm{P}^{\text{вэу}}_{\text{уст}}, \mathrm{W}^{\text{АБ}}_{\text{уст}}, \mathrm{P}^{\text{дэс}}_{\text{уст}}, x^{\text{у}}_{\text{сеть}}, \mathcal{S}^{\text{об}}\right). \tag{5}$$

$$\begin{pmatrix} P^{t}_{дэсi} \\ P^{t}_{фэпi} \\ P^{t}_{вэуi} \\ W^{t}_{АБзар-i} \\ W^{t}_{АБраз-i} \\ W^{t}_{АБi} \\ \Delta P^{t}_{i} \\ x^{yt}_{сетьi} \\ B^{t}_{i} \end{pmatrix} = \mathcal{A} \begin{pmatrix} P^{фэп}_{уст} \\ P^{вэу}_{уст} \\ P^{дэс}_{уст} \\ W^{АБ}_{уст} \\ x^{y}_{сеть} \\ \mathcal{O}^{t}_{клi} \\ P_{нt} \\ W^{t-1}_{АБi} \end{pmatrix}, \tag{6}$$

$$t = 1, \dots, T^{год}, i = 1, \dots, N^{мет}.$$

Энергия заряда АБ i-го года.

$$W^{год}_{АБзар-i} = \sum_{t=1}^{T^{год}} W^{t}_{АБзар-i}. \tag{7}$$

Среднегодовая энергия заряда АБ.

$$W^{ср}_{АБзар} = \frac{1}{N^{мет}} \sum_{i=1}^{N^{мет}} W^{год}_{АБзар-i}. \tag{8}$$

Стоимость замены АБ с учетом дисконтирования.

$$И^{э}_{зам.АБ} = \mathcal{F}_{зам}\left(W^{ср}_{АБзар}, n_{аб}, W^{80\%}_{АБ}, n^{80\%}_{цикл}, \mathcal{S}^{АБ}\right). \tag{9}$$

Среднегодовое потребление дизельного топлива.

$$B^{ср} = \frac{1}{N^{мет}} \sum_{i=1}^{N^{мет}} B^{год}_{t}. \tag{10}$$

Среднегодовые топливные издержки.

$$И^{ср}_{дт} = B^{ср} \cdot \mathcal{S}^{T}. \tag{11}$$

Потребление дизельного топлива i-го года.

$$B^{год}_{i} = \sum_{t=1}^{T^{год}} B^{t}_{i} + \left(W^{0}_{АБ} - W^{T^{год}}_{АБi}\right) \cdot \mathcal{b}_{уд}. \tag{12}$$

где К – суммарные капиталовложения в элементы ДСЭС, $И_{уп}$ – условно-постоянные издержки (от функции капиталовложений), $И^{ср}_{Тп}$ – среднегодовые топливные издержки, $И^{э}_{зам.АБ}$ - суммарные эксплуатационные издержки на замену АБ с учетом дисконтирования; $x^{y}_{сеть}$ – установленные параметры сетевого оборудования; $\mathcal{b}_{сеть}$ – логически-числовой оператор (система логических условий и функциональных зависимостей), позволяющий по заданным установленным мощностям ФЭП и ВЭУ, установленной емкости АБ и типоразмерах сетевого

оборудования, определить установленные параметры этого оборудования; $\mathcal{f}_{диз}$ - логически-числовой оператор позволяющий определить суммарную установленную мощность ДЭС, по заданной максимальной нагрузке потребителя ($P_{нагр}^{max}$) и установленной мощности ДГУ ($P_{дгу}^{уст}$); $y_{сеть}^{L}$ – вектор типоразмеров сетевого оборудования; $\mathcal{F}_{к}$ – функция определяющая зависимость капиталовложений от установленных мощностей элементов ДСЭС; $\mathcal{S}^{об}$ – вектор стоимостей типоразмеров оборудования; $\mathcal{A}$ – логически-числовой оператор, определяющий текущие параметры режима элементов ДСЭС в момент t в зависимости от $P_{уст}^{фэп}$, $P_{уст}^{вэу}$, $W_{уст}^{АБ}$, $P_{уст}^{дэс}$, $x_{сеть}^{у}$; $\mathcal{O}_{клi}^{t}$ – t-ый столбец матрицы параметров окружающей среды; $P_{нt}$ – текущая нагрузка потребителя; $W_{АБ}^{0}$ – заряд АБ в начале расчетного периода; $W_{АБi}^{Tгод}$ – заряд АБ в конце расчетного периода i-го года метеонаблюдений; $W_{АБзар-i}^{t}$ – энергия заряда АБ i-го года; $N^{мет}$ – число лет метеонаблюдений; $\mathcal{S}^{T}$ – стоимость топлива; $W_{АБ}^{80\%}$, $n_{цикл}^{80\%}$ - заряд АБ и предельное (до замены) количество циклов заряд/разряд АБ в буферном режиме эксплуатации с 80% разрядом АБ.

Рассмотренный выше метод оптимизации ДСЭС не позволяет определить показатели надежности электроснабжения потребителей.

При оптимизации ДСЭС с учетом надежности применялся следующий подход, суть которого состоит в том, что моделируется работа ДСЭС на протяжении расчетного периода (20 лет эксплуатации, 175200 часов). Весь этот период разбивается на одинаковые малые интервалы времени. Причем на протяжении каждого интервала времени считаются неизменными: значения метеопараметров (облачность, скорость ветра, давление, температура воздуха), значение среднего за интервал угла возвышения Солнца над горизонтом, нагрузка потребителей, состав работоспособного оборудования ДСЭС (генераторов, элементов преобразования и передачи электроэнергии, а также элементов силовой электроники), нагрузка генерирующего и сетевого оборудования, энергия заряда или разряда АБ.

Полагается, что каждый элемент ДСЭС может находится в следующих состояниях: работа, простой в холодном резерве, простой на плановые технические обслуживания (ТО) или ремонты, простой на послеаварийные восстановительные ремонты, вынужденный простой из-за останова других элементов. Элемент считается работоспособным, если он находится в работе или холодном резерве.

Для каждого i-го элемента ДСЭС вводятся счетчики времени работы. Значение k-го счетчика равно суммарному числу часов наработки i-го элемента с момента окончания k-го ТО или ремонта, до окончания t-го временного интервала. Кроме того, для каждого элемента ДСЭС вводится признак работоспособности R_t^i. $R_t^i = 1$ – i-ый элемент работоспособен на t-ом временном интервале, $R_t^i = 0$ – i-ый элемент не работоспособен.

Для каждого вида ТО (текущего, планового, капитального) i-го элемента ДСЭС задаются: предельная наработка (с момента окончания предыдущего аналогичного ТО или ремонта) ΔT_{ik}^{H}, по достижении которой i элемент выводится на соответствующее k-ое ТО или ремонт, где k – порядковый номер ТО или ремонта i-го элемента (ТО и ремонты упорядочены так, что с возрастанием k увеличивается ΔT_{ik}^{H}); продолжительность ТО или ремонта ΔT_{ik}^{R}; затраты на ТО или ремонт M_{ik}^{R}.

Для каждого элемента ДСЭС и для каждого временного интервала задается параметр потока отказов ς_{it}, равный вероятности аварийного выхода из строя i-го элемента ДСЭС на t-ом часовом временном интервале. Как правило, ς_{it} относящиеся к одному году расчетного периода принимаются одинаковыми. Кроме того, задается среднее время восстановительного ремонта i-го элемента ΔT_{ik}^{rep} и средние затраты на ремонт M_{ik}^{rep}.

Для каждого i-го элемента ДСЭС задаются множество других элементов системы, которые будут находиться в вынужденном простое, при остановке i-го элемента. Такое множество J_i^{for} включает номера тех элементов, которые не могут работать при выведении из работы i-го элемента.

Для учета случайного характера метеоусловий параметры окружающей среды каждого года расчетного периода принимаются равными соответствующим

параметрам некоторого года периода метеонаблюдений. Причем выбор этого года из всего списка лет метеонаблюдений осуществляется с использованием датчика случайных чисел, с учетом вероятности реализации каждого года из указанного списка.

Моделирование работы ДСЭС производится следующим образом. Перед началом первого шага по времени (т.е. первого часа расчетного периода) значения счетчиков всех элементов ДСЭС C_0^{ir} задаются равными нулю. Признаки работоспособности всех элементов ДСЭС для всех временных интервалов задаются равными 1 ($R_t^i = 1, i = 1 \dots N^э, t = 1 \dots T$, где $N^э$ – число элементов ДСЭС, T – число малых шагов по времени в расчетном периоде). Заряд АБ в начале расчетного периода принимается равным его максимально-возможному значению ($Q_{АБt0} = Q_{АБ}^{max}$).

Как отмечалось ранее, каждому году расчетного периода становится в соответствие один год из периода метеонаблюдений, выбираемый случайным образом. Для t-ого временного интервала расчетного периода определяются год, месяц, число и час, к которым относятся данный интервал. В качестве параметров окружающей среды на t-ом интервале принимаются параметры тех же месяца, числа и часа соответствующего года периода метеонаблюдений.

Для каждого t-ого временного интервала выполняются следующие шаги.

1. Определяются нагрузки потребителей на t-ом интервале и значения параметров окружающей среды на этом же временном интервале. Решается рассмотренная ранее задача распределения нагрузки между генерирующим оборудованием ДСЭС с учетом состава работоспособных элементов, для которых $R_t^i = 1$. В результате определяется расход дизельного топлива ДЭС и недоотпуск электроэнергии потребителям (если он имеет место), а также состав находящихся в работе элементов ДСЭС.

2. Значения счетчиков работы элементов ДСЭС, для которых $R_t^i = 1$ увеличивается на 1, а всех остальных остаются неизменными, т.е.

$$C_t^{ik} = \begin{cases} C_{t-1}^{ik} + 1; \ R_t^i = 1 \\ C_{t-1}^{ik}; \ R_t^i = 0 \end{cases}, \tag{13}$$

$$k = 1 \ldots k_i^{ТО},\ i = 1 \ldots N^э,$$

где $k_i^{ТО}$ – число видов ТО и плановых ремонтов i-го элемента, $N^э$ – число элементов ДСЭС.

3. Для каждого элемента, работающего на t интервале моделируются аварийные отказы. Для этого с помощью датчика случайных чисел с равномерным законом распределения в диапазоне от 0 до 1 генерируются случайные числа. Если полученное вещественное число X_{it}^p лежит в диапазоне от 0 до ς_{it}, то элемент (в конце t временного интервала переходит в состояние аварийного отказа). На следующем t+1 интервале, элемент (находившийся в аварийном режиме) будет находится в состоянии послеаварийного ремонта. В таком состоянии он будет находится на t+1, t+2, … $t+\Delta T_{ik}^{rep}$ интервалах.

Если в конце t-го интервала i-ый элемент переходит в аварийное состояние, то на интервалах t+1, t+2, … $t+\Delta T_{ik}^{rep}$ считаются не работоспособными элементы номера которых входят в множество J_i^{for}.

4. Определяются условия вывода элементов в плановые ТО и ремонты. Для этого проверяются условия

$$C_t^{ik} = \Delta T_{ik}^{H}. \tag{14}$$

Если такие условия выполняются, то начиная с t+1 временного интервала i-ый элемент выводится на плановое k-ое ТО или ремонт. Для i-го элемента принимаются $C_{t+1}^{ik} = 0, R_{t+1}^{i} = 0, R_{t+2}^{i} = 0 \ldots R_{t+\Delta T_{ik}^{H}}^{i} = 0$. Если условия выполняются для i-го элемента при одном t для разных k, то считается что выполняется более значимое ТО или ремонт (текущее → плановое → капитальное) с большим k, большим сроком обслуживания и затратами соответственно.

При этом C_{t+1}^{ik} полагается равным нулю, для k-го ТО и всех менее значимых ТО или ремонтов с меньшими значениями k.

Если в конце t-го интервала i-ый элемент выводится в запланированное ТО или ремонт, то на протяжении этого ТО или ремонта считаются не работоспособными элементы, номера которых входит в множество J_i^{for}. Индекс

работоспособности данных элементов на протяжении запланированного ТО или ремонта i-го элемента задаются равными нулю.

5. Если t = T, то расчет работы ДСЭС заканчивается. В противном случае t увеличивается на 1 и осуществляется возврат на пункт 1 и процесс повторяется.

По результатам расчетов определяются издержки каждого года эксплуатации (с учетом ТО, ремонтов и аварийных ситуаций) и годовой недоотпуск электроэнергии (если таковой имеется).

Поскольку результаты расчетов зависят от случайных параметров, определяющих выбор метеоусловий и аварийное отключение элементов, требуется определить математическое ожидание затрат и недоотпусков электроэнергии. Для этого необходимо выполнить серию расчетов работы ДСЭС на протяжении расчетного периода и на основе этого определить математические ожидания указанных величин.

Учет надежности требует разделения объектов генерации на соответствующие энергоблоки, серии, кластеры, то есть на такие подмножества элементов, которые могут отключаться из работы в случае аварийного отказа или запланированного ТО или ремонта, а также включаться в нее только одновременно.

Представленная в диссертации методика реализована в рамках разработанного ПВК. Его структурная схема приведена на рисунке 2. ПВК позволяет сформировать массивы параметров окружающей среды, задать графики нагрузок потребителя, провести оптимизацию состава оборудования ДСЭС методом покоординатного спуска (без учета надежности). В окрестности найденного оптимального решения провести оптимизацию с учетом надежности. ПВК обладает удобным интерфейсом для работы пользователя.

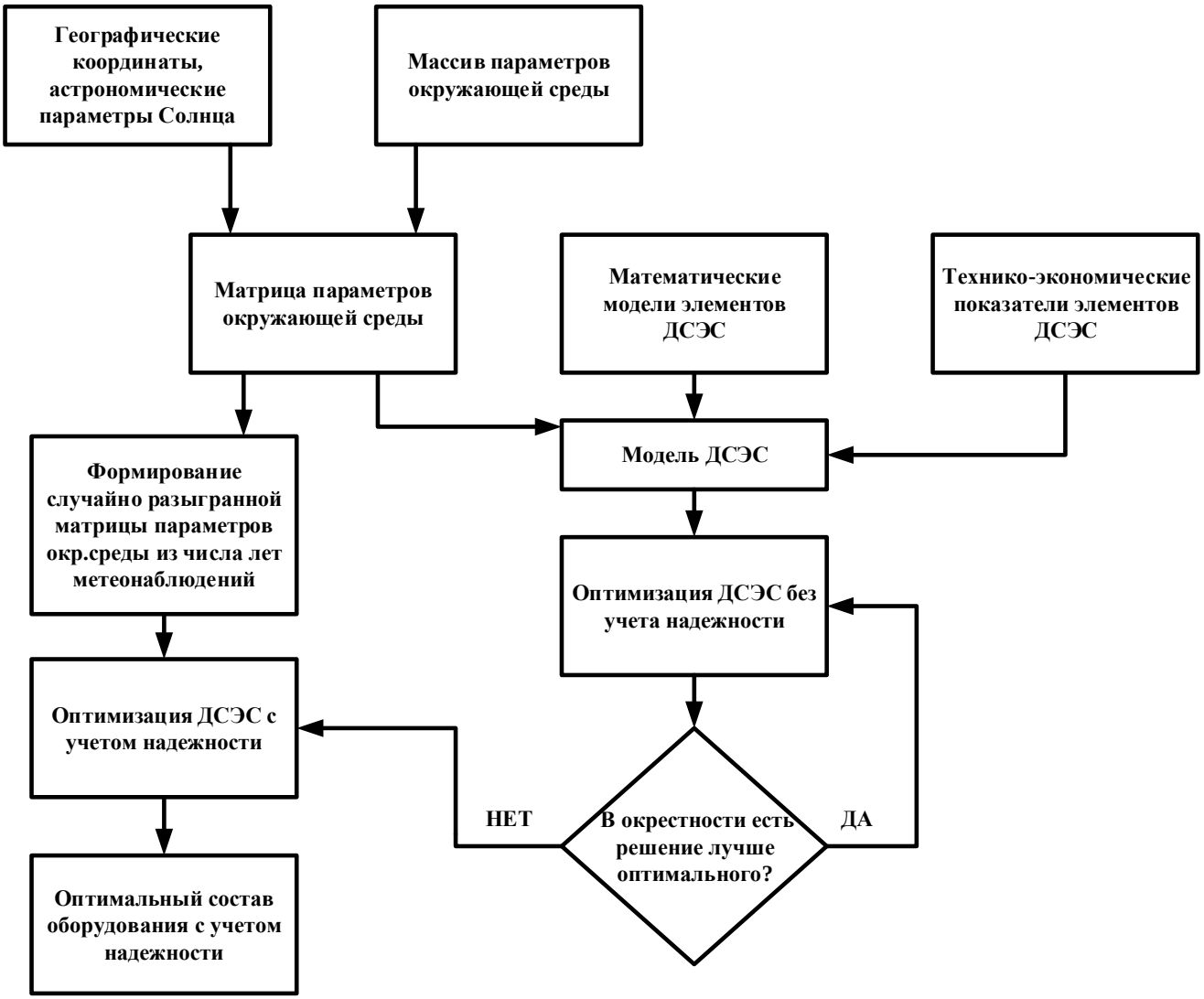

Рисунок 2 – Структурная схема ПВК оптимизации ДСЭС

В третьей главе представлены оптимизационные расчеты трех ДСЭС, использующих ВИЭ и АБ, расположенных в различных климатических зонах Республики Якутия.

В качестве первого примера была рассмотрена ДСЭС *«Вариант 1»* с расположением в прибрежной арктической зоне (Булунский район, Республика Якутия). Географические координаты 71,38 С.Ш. и 128,52 В.Д. В поселении находится метеостанция № 21824, фиксирующая параметры окружающей среды с шагом 3 часа. На текущий момент количество лет метеонаблюдений равно 9.

Максимальная нагрузка в зимний период составляет 65 кВт, а минимальная 32 кВт. В летний период максимальная нагрузка составляет 43 кВт, а минимальная 22 кВт. Оптимизируется мощность ВЭУ, ФЭП, емкость АБ. Расчеты проводились

для свинцово-кислотных (С-К) и литий-ионных (Л-И) АБ. С-К АБ имеют меньшую стоимость, а также меньшее число циклов заряд/разряд до замены.

Результаты оптимизации ДСЭС *«Вариант 1»* с использованием С-К АБ представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Установленная мощность, стоимость и эксплуатационные затраты в оптимальном варианте ДСЭС *«Вариант 1»* со С-К АБ

Тип оборудования	**$P_{уст}$, кВт**	**K_{Σ}, млн. руб.**	**Доля от K_{Σ}, %**	**$K_{уст}$, млн. руб.**	**M_{Σ}, млн. руб.**
ФЭП	0	0	0	0	0
ВЭУ	150	5	35,3%	2,125	0,112
ДЭС	2 х 75	2,270	16%	1,157	0,178
АБ	720 кВт*ч	5,259	37,2%	2,235	0,059
СИН	0	0	0	0	0
БИН	180	1,615	11,5%	0,823	0,018

Примечание: $P_{уст}$ *– установленная мощность,* K_{Σ} *– стоимость элемента,* $K_{уст}$ *– затраты на доставку и установку оборудования,* M_{Σ} *– ежегодные эксплуатационные издержки по элементам.*

В таблице 2 приводятся итоговые результаты ДСЭС *«Вариант 1»* с использованием чисто дизельного варианта генерации, ветро-дизельного варианта со С-К и Л-И АБ.

Таблица 2 - Итоговые результаты оптимизации ДСЭС *«Вариант 1»*

ВЭУ, кВт	**АБ кВт*ч**	**ДЭС, кВт**	**Кап.влож., млн.руб.**	**Расход топлива, тонн в год**	**Годовая выработка по элементам, тыс. кВт*ч**			**LCOE, Руб/ кВт*ч**
Электроснабжение от ДЭС					ДЭС	Нагрузка		**23,22**
-	-	2х75	2,27	123,1	351,7	351,7		
Электроснабжение от ВЭУ-ДЭС-АБ (С-К)					ВЭУ	ДЭС	Нагр.	**14,30**
150	720	2х75	14,144	47,6	228,6	134,3	351,7	
Электроснабжение от ВЭУ-ДЭС-АБ (Л-И)					ВЭУ	ДЭС	Нагр.	**15,37**
150	308	2х75	15,635	54,6	205,7	156,1	351,7	

Согласно полученным результатам оптимизации ДСЭС *«Вариант 1»*, для метеоусловий *Булунского района*, оптимальной технологией производства электроэнергии является ветро-дизельный комплекс генерации со свинцово-кислотными АБ. Применение литий-ионных АБ позволяет исключить их замену на протяжении всего цикла эксплуатации. Стоимость произведенного кВт*ч меньше в варианте со свинцово-кислотными АБ, за счет меньших капиталовложений (на 1,491 млн.рублей) и меньшего среднегодового потребления дизельного топлива (на 7 тонн).

В качестве второго примера рассматривается ДСЭС *«Вариант 2»* с расположением в южном районе Республики Якутия. (Усть-Майский район, н.п. Усть-Миль). Географические координаты 59,41 С.Ш. и 133,06 В.Д. В поселении находится метеостанция № 31041, фиксирующая параметры окружающей среды. На текущий момент количество лет метеонаблюдений равно 9.

При оптимизации ДСЭС *«Вариант 2»* использовался тот же график нагрузок потребителей, что и в *«Вариант 1»*.

В таблице 3 представлены показатели элементов ДСЭС в оптимальном варианте со С-К АБ.

Таблица 3 - Установленная мощность, стоимость и эксплуатационные затраты в оптимальном варианте ДСЭС *«Вариант 2»*

Тип оборудования	**$P_{уст}$, кВт**	**K_{Σ}, млн. руб.**	**Доля от K_{Σ}, %**	**$K_{уст}$, млн. руб.**	**M_{Σ}, млн. руб.**
ФЭП	150	11,390	51,53%	4,840	0,228
ВЭУ	0	0	0	0	0
ДЭС	2 х 75	2,270	12,33%	1,158	0,159
АБ	720 кВт*ч	5,259	23,80%	2,235	0,053
СИН	150	0,658	3,57%	0,335	0,007
БИН	180	1,615	8,77%	0,824	0,018

В таблице 4 приводятся итоговые результаты ДСЭС *«Вариант 2»* с использованием чисто дизельного варианта генерации, ветро-дизельного варианта со С-К и Л-И АБ.

Таблица 4 - Итоговые результаты оптимизации ДСЭС *«Вариант 2»*

ФЭП кВт	**АБ, кВт*ч**	**ДЭС, кВт**	**Кап.влож., млн.руб.**	**Расход топлива, тонн в год**	**Годовая выработка по элементам, тыс. кВт*ч**			**LCOE Руб./ кВт*ч,**
Электроснабжение от ДЭС					ДЭС	Нагрузка		**23,22**
-	-	2х75	2,27	123,1	351,7	351,7		
Электроснабжение от ФЭП-ДЭС-АБ (С-К)					ФЭП	ДЭС	Нагр.	**21,02**
150	720	2х75	21,192	63,0	185,6	180	351,7	
Электроснабжение от ФЭП-ДЭС-АБ (Л-И)					ФЭП	ДЭС	Нагр.	**21,69**
150	678	2х75	30,783	63,3	184,7	181	351,7	

Как видно из таблиц 3-4, оптимальной технологией производства электроэнергии для ДСЭС *«Вариант 2»* является фото-дизельный комплекс генерации со свинцово-кислотными АБ.

В качестве третьего примера рассмотрим ДСЭС *«Вариант 3»* с расположением на территории юго-западной Якутии (Ленский район, н.п. Алысардах). Географические координаты 59,52 С.Ш. и 111,92 В.Д. В 30 километрах от поселения находится метеостанция № 30054, фиксирующая параметры окружающей среды. На текущий момент количество лет метеонаблюдений равно 10.

Максимальная нагрузка потребителей наблюдается в зимний период и составляет 900 кВт, а минимальная 300 кВт в летний.

В таблице 5 приводятся итоговые результаты ДСЭС *«Вариант 3»* использованием чисто дизельного варианта генерации, ветро-дизельного варианта со С-К и Л-И АБ.

Таблица 5 - Установленная мощность, стоимость и эксплуатационные затраты в оптимальном варианте ДСЭС *«Вариант 3»*

Тип оборудования	**$P_{уст}$, кВт**	**K_{Σ}, млн. руб.**	**$K_{уст}$, млн. руб.**	**Доля от K_{Σ}, %**	**M_{Σ}, млн. руб.**
ФЭП	1575	106,785	45,384	36,04%	2,136
ВЭУ	1850	92,500	39,313	31,22%	1,850
ДЭС	2 х 900	18,460	9,415	6,23%	1,293
АБ	7140 кВт*ч	52,122	22,152	17,59%	0,261
СИН	1600	5,957	3,038	2,01%	0,030
БИН	1500	12,600	6,426	4,26%	0,126
ТР-ФЭП	1600	0,809	0,413	0,27%	0,036
ТР-ВЭУ	2500	1,312	0,669	0,42%	0,078
ТР-ОБЩ	4000	2,350	1,199	0,79%	0,139
ВЛ-ФЭП	-	1,678	-	0,57%	0,036
ВЛ-ВЭУ	-	1,678	-	0,57%	0,036

Примечание: *ТР-ОБЩ, ТР-ФЭП, ТР-ВЭУ – трансформаторы.*

В таблице 6 представлены итоговые результаты ДСЭС *«Вариант 3»* с использованием чисто дизельного варианта генерации, ветро-дизельного варианта со С-К и Л-И АБ.

Таблица 6 - Итоговые результаты оптимизации ДСЭС *«Вариант 3»*

ФЭП, кВт	**ВЭУ, кВт**	**АБ, кВт*ч**	**ДЭС, кВт**	**Кап. влож, млн. руб.**	**Расход топлив, тонн в год**	**Годовая выработка по элементам, тыс. кВт*ч**				**LCOE, Руб./ кВт*ч,**
Электроснабжение от ДЭС						ДЭС		Нагрузка		**24,02**
-		-	2х900	18,460	1615,84	4616,6		4616,6		
Электроснабжение от ФЭП-ВЭУ-ДЭС-АБ (С-К)						ФЭП	ВЭУ	ДЭС	Нагр.	**17,80**
1575	1850	7140	2х900	296,27	574,70	1535,7	1574,7	1642	4616,6	
Электроснабжение от ФЭП-ВЭУ-ДЭС-АБ (Л-И)						ФЭП	ВЭУ	ДЭС	Нагр.	**18,62**
1600	1550	5359	2х900	347,7	633,7	1559,9	1379,2	1811	4616,6	

Согласно полученным результатам комплексной оптимизации ДСЭС *«Вариант 3»* для метеоусловий н.п. «*Алысардах*» оптимальной технологией производства электроэнергии является фото-ветро-дизельный комплекс генерации со свинцово-кислотными АБ.

Для ДСЭС *«Вариант 3»* проведены расчеты с учетом надежности электроснабжения потребителей. При этом рассматривались варианты оборудования, расположенные в окрестности оптимального решения, найденного без учета надежности.

В таблице 7 показаны составы оборудования, находящиеся в области оптимального решения ДСЭС «*Вариант 3»*

Таблица 7 - Комбинации состава оборудования в области оптимального решения ДСЭС *«Вариант 3»*

$P_{уст}^{ВЭУ}$, **кВт**	$P_{уст}^{фэп}$, **кВт**	$W_{уст}^{АБ}$, **кВт*ч**	**LCOE, руб./кВт*ч**	$P_{уст}^{ВЭУ}$, **кВт**	$P_{уст}^{фэп}$, **кВт**	$W_{уст}^{АБ}$, **кВт*ч**	**LCOE, руб./кВт*ч**
1800	1550	7140	17,83	1900	1575	7140	17,82
1850	1550		17,81	1800	1600		17,81
1900	1550		17,82	1850	1600		17,81
1800	1575		17,81	1900	1600		17,82
1850	1575		**17,80**				

В результате серии из 50 расчетов получены результаты комплексной оптимизации состава оборудования с учетом надежности, где были получены следующие значения установленных мощностей элементов генерации: ФЭП – 1550 кВт, ВЭУ – 1850 кВт, АБ – 7140 кВт*ч.

Средняя стоимость произведенного кВт*ч при учете надежности увеличилась на 5,1% и составляет 18,72 руб./кВт*ч (по сравнению с расчетом без

учета надежности - 17,80 руб.*кВт*ч). Расчеты показали, что для оптимального варианта состава оборудования коэффициент бездефицитной работы составляет 0,9993.

Учет надежности позволяет определить влияние аварийных и запланированных ТО и ремонтов на ранее полученный оптимальный состав оборудования без учета надежности, а также на стоимость произведённой единицы электроэнергии. Кроме того определяются показатели надежности электроснабжения потребителей: коэффициент бездефицитной работы и среднегодовой недоотпуск электроэнергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика комплексной оптимизации состава оборудования ДСЭС, позволяющая учесть корреляцию между параметрами окружающей среды (скорость ветра, облачность, давление, температура воздуха и т.д.), а также динамику изменения данных параметров, основанная на использовании многолетних массивов наблюдений автоматических метеостанций.
2. Реализована модель расчета электрических режимов ДСЭС использующих ВИЭ и АБ, в рамках решения оптимизационной задачи, позволяющая осуществить выбор элементов трансформации, передачи, преобразования и аккумулирования электроэнергии.
3. Предложен подход к расчету показателей надежности ДСЭС с ВИЭ, АБ, элементами силовой электроники, основанный на хронологическом моделировании (последовательном рассмотрении с шагом один час всех режимов работы ДСЭС на протяжении расчетного периода) в сочетании с учетом случайного характера аварийных отказов элементов ДСЭС и параметров окружающей среды. Данный подход позволяет определить показатели надежности электроснабжения потребителей ДСЭС по годам расчетного периода. При этом учитываются параметры потока отказов по элементам ДСЭС, продолжительность плановых ТО и послеаварийных ремонтов, а также предельные наработки

элементов ДСЭС, по достижении которых они выводятся в плановые ТО и ремонты.

4. Разработан ПВК, реализующий данную методику комплексной оптимизации. ПВК создан с использованием инструмента имитационного моделирования Matlab/Simulink. ПВК располагает удобным интерфейсом для работы пользователя, имеет открытый скрипт код, что позволяет вносить изменения, поправки и т.д.

5. Представлены результаты комплексной оптимизации трех ДСЭС, для климатических условий северных, юго-восточных и юго-западных районов Республики Якутия. Показана эффективность использования ВИЭ в сочетании с АБ для данных условий. При этом для климатических условий северных районов Республики Якутия эффективным оказался ветро-дизельный с АБ, для юго-восточных районов фото-дизельный с АБ, а юго-западных фото-ветро-дизельный с АБ вариант состава оборудования. Применение ВИЭ и АБ позволяет экономить по сравнению с чисто дизельным вариантом от 50% до 70% дизельного топлива и обеспечивает сокращение удельной стоимости электроэнергии на величину 2,20 до 8,92 руб./кВт*ч.

6. Проведено сопоставление эффективности использования свинцово-кислотных и литий-ионных аккумуляторных батарей (первые имеют меньшую стоимость, а вторые - большее предельное число циклов заряд-разряд). Показано, что для всех вариантов ДСЭС, экономически более эффективными являются свинцово-кислотные АБ.

7. Для ветро-фото-дизельного с АБ варианта (условно расположенного в юго-западной Якутии) проведена оценка надежности электроснабжения потребителей. Показано, что ранее полученный оптимальный состав оборудования (без учета надежности) претерпел некоторые изменения, а именно скорректировалась (уменьшилась на 25 кВт) установленная мощность ФЭП. Увеличилась на 0,92 руб./кВт*ч удельная стоимость электроэнергии. Среднегодовой недоотпуск электроэнергии составляет 0,07% от годового потребления электроэнергии, что свидетельствует о достаточно высокой надежности электроснабжения выбранного варианта оборудования.

Основные выводы, изложенные в диссертации содержатся в следующих работах:

Публикации в изданиях, входящих в список изданий ВАК:

1. Д.Н. Карамов. Актуальность применения возобновляемых источников энергии в децентрализованных населенных пунктах России на примере Ленского района Республики Саха (Якутия) // Вестник ИрГТУ. 2013. том 11. С. 279 -283.
2. Д.Н. Карамов. Влияние объектов агропромышленного комплекса на результат комплексной оптимизации децентрализованных систем электроснабжения, использующих возобновляемые источники энергии // Вестник КрасГАУ. 2015. том 8. С. 107-112.
3. Д.Н. Карамов. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Вестник ИрГТУ. 2015. том 9. С. 133-140.

Публикации в других изданиях:

4. Д.Н. Карамов. Структурная оптимизация автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Сборник трудов молодых ученых ИСЭМ СО РАН. 2015. С. 84-89.
5. Д.Н. Карамов. Комплексная оптимизация автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии и аккумулирующие устройства на примере п. «Батамай» Кобяйского района Якутии // Сборник трудов всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке: Инновационное развитие и управление». 2015. С. 1-9.
6. Д.Н. Карамов, А.М. Клер. Оптимизация структуры генерирующих мощностей автономных систем электроснабжения, использующих возобновляемые источники энергии и накопители энергии // Сборник трудов международного конгресса «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность». 2015. С. 196-200.

Отпечатано в ИСЭМ СО РАН

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Заказ №44, тираж 100 экз.