

На правах рукописи



Кривенко Татьяна Витальевна

**РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ
АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Тремясов Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты: **Обухов Сергей Геннадьевич**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, профессор

Бастрон Андрей Владимирович
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет», кафедра «Электроснабжение сельского хозяйства», заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится «31» октября 2018 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10 и на сайте: <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан « » сентября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На территории Российской Федерации имеется множество децентрализованных населенных пунктов, где в качестве основного источника электроэнергии используется преимущественно дизельные электростанции (ДЭС). Только по Красноярскому краю 118 населенных пунктов получают электроэнергию от ДЭС с годовой выработкой 195 013,368 МВт·ч электрической энергии. Функционирование действующих ДЭС связано с периодическими отказами генерирующего оборудования. В соответствии с распоряжением Правительства РФ №1-р от 08.01.09 «Об использовании возобновляемых источников энергии» и федеральным законом №261-ФЗ от 23.11.09 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» повысить эффективность генерации, снизить себестоимость электроэнергии и уменьшить влияние отказов оборудования ДЭС возможно за счет создания автономных систем генерации, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Интеграция ВИЭ в автономные системы генерации (АСГ) придает ей новые свойства, но и создает некоторые проблемы. Функционирование ВИЭ существенно отличается от дизельного генерирующего агрегата и зависит от потенциала природных энергоресурсов, имеющих переменный характер. АСГ, основанные только на ветровой и/или солнечной энергии, не могут обеспечить непрерывное электроснабжение изолированных потребителей. Для поддержания надежного электроснабжения потребителя от генераторов на базе ВИЭ необходимо их применение совместно с источниками гарантированной мощности: дизельными генераторами (ДГ) и/или накопителями электрической энергии (аккумуляторные батареи). При планировании и проектировании развития АСГ на основе ветроэнергетических установок (ВЭУ), фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), ДГ и аккумуляторных батарей (АБ) важным аспектом является оценка надежности их функционирования. Эксплуатируемое оборудование находится под воздействием множества возмущающих факторов, существенно влияющих на надежную работу АСГ.

Степень разработанности. Разработке математических моделей и методов оценки надежности автономных систем генерации на основе ветровой и/или солнечной энергии посвящены работы авторов: Н.И. Воропая, А.М. Клера, С.В. Бабурина, В.А. Тремясова, А.В. Боброва, Д.Н. Карамова, Billinton R., Allan R., Karki R., Bagen, Hu P., Bakirtzis A. G., Cue Yu., Kishore L. N., Li W., Abouzahr I., Ramakumar R., Stember L. H., Park J. A., Liang W., Choi J. и др.

Анализ выполненных работ показал, что некоторые вопросы, связанные с надежностью АСГ на основе ВИЭ, остались не решенными или требуют более тщательной проработки. В частности, недостаточно полно учитываются: события и процессы, возникающие в реальной эксплуатации АСГ (аварийные отказы и послеаварийные ремонты генерирующего оборудования, коммутационной аппаратуры и другого оборудования), а также отказы ВИЭ по причине погодных условий.

В связи с этим представляется актуальным совершенствование методов оценки надежности АСГ на основе ветровой и/или солнечной энергии. Учет надежности позволяет оценить влияние аварийных отказов и состава оборудования на величину выработки электроэнергии энергокомплексами (ЭК), а также уточняет технико-экономические показатели на стадии проектирования.

Объектом исследования являются АСГ на основе ВЭУ и/или ФЭП, ДГ и АБ.

Предмет исследования – надежность функционирования АСГ на основе использования ветровой и/или солнечной энергии.

Цель диссертационной работы – развитие математических моделей и методов оценки надежности АСГ на основе ВИЭ, позволяющих учитывать надежность используемого оборудования и изменение погодных условий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ статистических данных по отказам и показателям надежности оборудования АСГ с использованием ВИЭ. Выполнить анализ существующих методов расчета надежности АСГ на основе ветровой и/или солнечной энергии.

2. Усовершенствовать логико-вероятностный метод на основе динамического дерева отказов (ДДО) для оценки надежности автономного ветродизельного комплекса (ВДК).

3. Предложить и реализовать вероятностный мультиматричный метод для анализа надежности автономной солнечно-дизельной установки (СДУ).

4. Развить модель надежности объединенной системы генерации для расчета надежности гибридного энергокомплекса, включающего ВЭУ, ФЭП и ДГ.

5. Создать комплекс компьютерных программ, реализующих разработанные методы оценки надежности АСГ на основе ВИЭ.

6. На основе разработанных методов и алгоритмов выполнить исследование надежности и экономической эффективности проектируемых автономных систем генерации с ВИЭ для территории Красноярского края.

Научная новизна и положения выносимые на защиту:

1. Усовершенствован логико-вероятностный метод на основе ДДО для оценки надежности автономного ВДК с учетом скорости ветра, отличающийся от использующихся в настоящее время методов возможностью моделировать зависимые процессы отказов, анализировать последовательность происходящих событий, учитывать состояния резервных элементов системы и коммутационной аппаратуры путем введения динамических операторов, реализуемых с помощью марковских моделей.

2. Предложен и реализован мультиматричный метод для расчета надежности автономной СДУ, основанный на вероятностной модели, позволяющий учитывать стохастический характер солнечной радиации, выявить все виды аварий, возможных при совпадении отказов элементов установки с ремонтными и эксплуатационными режимами, отличающимися составом и вероятностью повреждения оборудования.

3. Развита модель надежности объединенной системы генерации, в состав которой входят ВЭУ, ФЭП и ДГ, позволяющая учесть отказы генерирующих элементов системы, погодные условия и оценить недоотпуск электроэнергии потребителям.

Практическая значимость работы состоит в возможности оценить надежность и экономическую эффективность АСГ различных конфигураций, использующих ВИЭ, и выбрать оптимальное техническое решение на стадии проектных работ.

Результаты исследований, содержащиеся в диссертации, использованы в проектной практике ООО «Проектно-монтажная компания Сибири» в виде: практического использования математических моделей оценки надежности ветродизельных и солнечно-дизельных установок с учетом изменения погодных условий; методики расчета экономической эффективности технических решений АСН на основе ВИЭ с учетом надежности.

Методы исследования. При выполнении исследований, результаты которых приведены в диссертации, использовались методы теории надежности, теория вероятностей, теория марковских процессов, теория графов, методы многоцелевой оптимизации, методы оценки экономической эффективности.

Личный вклад автора. Все результаты, вынесенные на защиту, получены лично автором. Основные положения методов оценки надежности АСГ с ВИЭ обсуждались с научным руководителем.

Степень достоверности результатов подтверждается корректностью использования известных методов теории надежности, а также удовлетворительной сходимостью оценок, с результатами, полученными другими авторами при решении аналогичных задач.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на: VIII Международной научно-технической конференции «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» (Благовещенск, 2015 г.); VI Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век – 2016» (Курск, 2016 г.); XIV Международной научно-практической конференции «Инновационные научные исследования: теория, методология, практика» (Пенза, 2018 г.); X Всероссийской технической конференции «Молодежь и наука» (Красноярск, 2014 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Борисовские чтения» (Красноярск, 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 работы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований, 6 работ – в трудах Международных и Всероссийских научно-технических конференций, 3 работы в других изданиях. В каждой работе, опубликованной в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 50 %.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и семи

приложений. Она содержит 127 страниц основного текста, 23 рисунка, 38 таблиц и список использованной литературы из 114 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные результаты, составляющие предмет научной новизны, практическая значимость работы и личный вклад автора, приведена структура диссертации.

В первой главе дана общая характеристика проблемы надежности в децентрализованных системах электроснабжения, рассмотрено применение ВИЭ в АСГ, в частности ВЭУ и/или ФЭП совместно с ДГ и/или АБ. Проанализированы основные причины отказов оборудования систем генерации на основе ВИЭ и их показатели надежности. Отказы ВИЭ, возможны как по техническим причинам, так и при изменении погодных условий (наличие или отсутствие солнечной радиации для ФЭП, недостаточная скорость ветра или штормовой ветер для ВЭУ).

Проведен аналитический обзор существующих методов оценки надежности АСГ на основе ветровой и/или солнечной энергии. Представлены наиболее известные методы, в том числе вероятностные, метод дерева отказов, метод пространства состояний (теория марковских процессов), статистическое моделирование (метод Монте-Карло) и др.

Не смотря на большое разнообразие методов анализа надежности систем генерации с использованием ВИЭ, некоторые вопросы остались не решенными или требуют более тщательной проработки. В частности, недостаточно полно, учитываются: влияние погодных условий на надежную работу автономных систем генерации; аварийные отказы генерирующего и вспомогательного оборудования.

На основе проведенного анализа обоснована необходимость развития математических моделей надежности энергообъектов для совершенствования методов оценки надежности и технико-экономического анализа АСГ с использованием ВИЭ.

Вторая глава посвящена развитию математических моделей и методов анализа надежности АСГ на основе ВИЭ. Состав оборудования АСГ во многом зависит от природного потенциала ВИЭ на рассматриваемой территории.

При рассмотрении различных конфигураций, включающих ВЭУ, ФЭП, ДГ и АБ, необходимо учитывать особенности таких ЭК. Так для оценки надежности АСГ, содержащих ВЭУ, достаточно учитывать два вида погодных условий: нормальные и неблагоприятные (штиль, слабый ветер, ураган). Однако представление погоды моделью с двумя состояниями не может быть применено к автономным установкам с использованием ФЭП. Это связано с суточной цикличностью и сезонной изменчивостью интенсивности солнечного излучения.

В процессе выполнения исследований были разработаны математические модели надежности для трех основных конфигураций АСГ: ВДК, СДУ и гибридных ЭК, содержащих ВЭУ, ФЭП и ДГ.

Учитывая особенности функционирования автономного ВДК (рисунок 1), разработан логико-вероятностный метод анализа надежности на базе ДДО, который позволяет учитывать характеристики ветрового потока, отказы оборудования, состояния резервных элементов системы, зависимые процессы отказов, анализировать последовательность происходящих событий.

ВДК часто функционируют в различных погодных условиях. По этой причине моделирование погодных условий выполняется путем разбиения деревьев на несколько фрагментов (рисунок 2). При построении ДДО для ВДК учитываются расчетная скорость ветра $v_{\min} < v < v_{\max}$ (нормальные погодные условия) и нерасчетная скорость ветра $v_{\max} \leq v, v \leq v_{\min}$ (неблагоприятные погодные условия), при которой установка не вырабатывает электроэнергию.

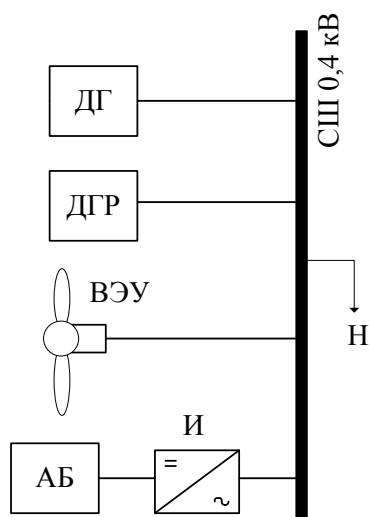


Рисунок 1 – Схема автономного ВДК: ДГ – рабочий дизельный генератор; ДГР – резервный дизельный генератор; ВЭУ – ветроэнергетическая установка; АБ – блок АБ; И – инвертор; СШ – сборная шина; Н – нагрузка

В ДДО используются три основных динамических оператора: приоритетное И – «*PAND*» (учитывает последовательность происходящих событий), последовательность возникновения событий «*SEQ*» (учитывает строгую последовательность возникновения событий) и состояние резерва «*SPARE*» (учитывает отказы резервных элементов системы).

Применяемые в работе динамические операторы реализуются с помощью марковских моделей. На рисунке 3 показаны диаграммы пространства состояний динамических операторов ДДО применительно к схеме ВДК, представленной на рисунке 1. В качестве показателей надежности в моделях используются интенсивности отказов λ , 1/год, и восстановлений μ , 1/год. Затененные состояния в диаграммах являются отказом всех элементов системы.

Влияние нерасчетной скорости ветра на функционирование ВЭУ в ДДО отражено с помощью логического знака «ЗАПРЕТ» (шестиугольник). Входное событие логического знака «ЗАПРЕТ» в ДДО дает на выходе событие, которое происходит с определенной вероятностью q . Учет последовательности происходящих событий, отказов резервных элементов системы, функциональной зависимости событий в ДДО достигается путем введения динамических операторов.

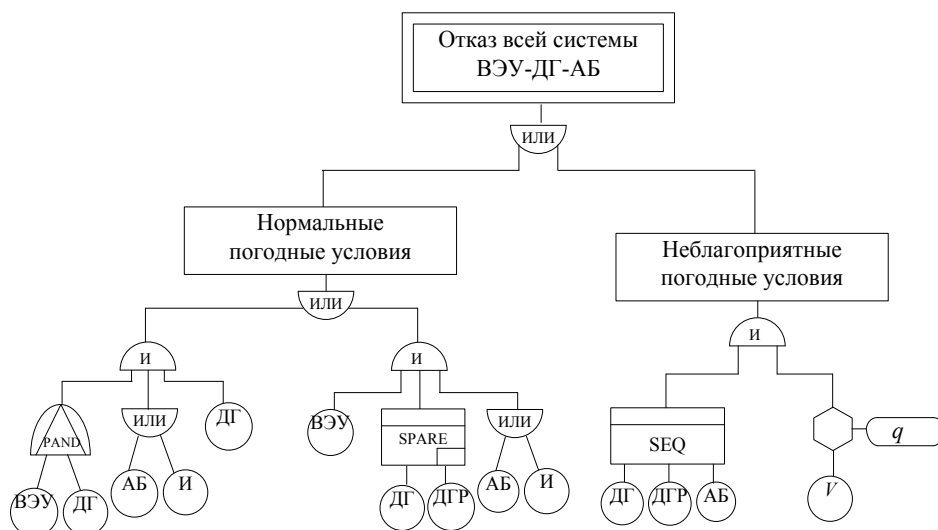


Рисунок 2 – Динамическое дерево отказов для автономного ВДК: *PAND*, *SEQ*, *SPARE* – динамические операторы; *V* – отказ ВЭУ по причине погодных условий; *q* – условная вероятность появления нерасчетной скорости ветра

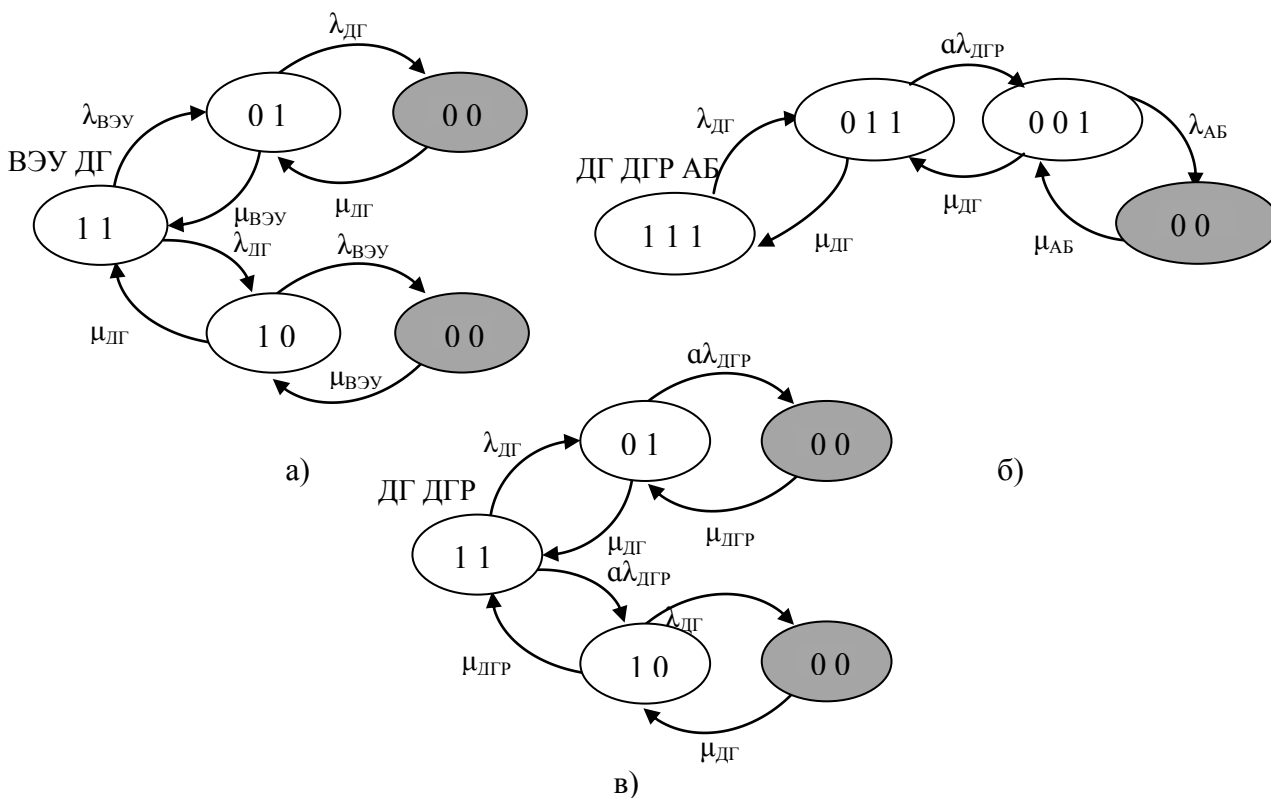


Рисунок 3 – Марковские модели для динамических операторов ДДО: а) *PAND*; б) *SEQ*; в) *SPARE*: 1 – работоспособное состояние, 0 – неработоспособное состояние; $\alpha\lambda$ – интенсивность отказов резервного элемента системы

Переходы состояний описываются системой дифференциальных уравнений

$$p'_k(t) = -p_k(t) \sum_{i \in E(k)} \lambda_{ki} + \sum_{i \in E(k)} \lambda_{ik} p_i(t), \quad (1)$$

где $i \in A$ означает, что суммирование ведется по всем таким состояниям i , которые относятся к множеству A ; $E(k)$ – множество состояний, из которых возмо-

жен непосредственный переход в некоторое состояние k ; $e(k)$ – множество состояний, в которые возможен непосредственный переход из данного состояния k ; $p_i(t)$ – вероятность пребывания системы в i -ом состоянии в момент времени t ; λ_{ik} – интенсивность перехода из состояния i в состояние k .

В результате решения системы уравнений получаем значения вероятностей состояний и стационарный коэффициент готовности для динамического оператора $K_{\Gamma}^{\text{оп}}$. Показателем выходного события динамического оператора является коэффициент простоя

$$q^{\text{оп}} = 1 - K_{\Gamma}^{\text{оп}}. \quad (2)$$

Для количественной оценки выходного события в ДДО применяется метод минимальных сечений отказов (МСО). Метод позволяет найти коэффициенты простоя генерирующих агрегатов и ветродизельного комплекса в целом.

Коэффициент простоя для j -го элемента ДДО равен

$$q_j = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} \left[1 - e^{-(\lambda_j + \mu_j)t} \right], \quad (3)$$

где λ_j – интенсивность отказов j -го элемента системы, 1/год; μ_j – интенсивность восстановления j -го элемента системы, 1/год; t – расчетное время.

Вероятность существования i -го МСО определяется по следующим формулам:

– при отсутствии в i -ом МСО динамических операторов

$$q_i^* = \prod_{j=1}^n q_j, \quad (4)$$

где n – число МСО;

– при включении в i -е МСО динамических операторов

$$q_i^{\text{оп}} = \prod_{k=1}^m q_k^{\text{оп}} \prod_{j=1}^n q_j, \quad (5)$$

где m – число k -х динамических операторов, входящих в i -е МСО.

При нерасчетной скорости ветра в ДДО коэффициент простоя ВЭУ по причине погодных условий определяется с помощью выражения

$$q_V = \frac{\lambda_V}{\lambda_V + \mu_V} \left[1 - e^{-(\lambda_V + \mu_V)t} \right], \quad (6)$$

где $\lambda_V = 1/T_0$ – интенсивность появления нерасчетной скорости ветра, 1/год; $\mu_V = 1/T_N$ – интенсивность восстановления расчетной скорости ветра, 1/год; T_0 и T_N – соответственно периоды погоды с нерасчетной и расчетной скоростью ветра.

Тогда вероятность отказа ВЭУ по причине погодных условий

$$q_V^* = q_V \cdot q, \quad (7)$$

где q – условная вероятность появления нерасчетной скорости ветра.

Вероятность существования l -го МСО при нерасчетной скорости ветра и включении k -го динамического оператора определяется по формуле

$$q_l^* = q_V^* q_k^{\text{оп}}. \quad (8)$$

На основе выше приведенных формул можно определить коэффициент простоя ВДК в целом по выражению

$$q_c \approx \sum_{i=1}^{N_c} (q_i^* + q_i^{*OP}) + \sum_{l=1}^{N_d} q_l^* , \quad (9)$$

где N_c – число МСО в ВДК при расчетной скорости ветра; N_d – число МСО при нерасчетной скорости ветра, включающих динамические операторы.

Среднее значение аварийной недовыработки энергии ВЭУ в течение длительности нормальных погодных условий вычисляется по формуле

$$\Delta W_{\text{НП}}^{\text{ВЭУ}} = P_{\text{ср}}^{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{НП}} \cdot q_{\text{ВЭУ}} , \quad (10)$$

где $P_{\text{ср}}^{\text{ВЭУ}}$ – математическое ожидание средней мощности ВЭУ; $T_{\text{НП}}$ – длительность нормальных погодных условий; $q_{\text{ВЭУ}}$ – коэффициент простоя ВЭУ из-за отказов оборудования.

Годовая недовыработка электроэнергии ВЭУ при неблагоприятных погодных условиях

$$\Delta W^{\text{ВЭУ}} = P_{\text{ср}}^{\text{ВЭУ}} \cdot (8760 - T_{\text{НП}}) \cdot q_v^* . \quad (11)$$

Расчет годовой недовыработки электроэнергии генерирующими агрегатами ВДК производится по формуле

$$\Delta W_{\text{ВДК}} = \Delta W_{\text{НП}}^{\text{ВЭУ}} + \Delta W^{\text{ВЭУ}} + \Delta W^{\text{ДГ}} + \Delta W^{\text{АБ}} , \quad (12)$$

где $\Delta W^{\text{ДГ}}$, $\Delta W^{\text{АБ}}$ – средние значения аварийной недовыработки энергии при отказах ДГ и АБ.

Для реализации предложенного метода с использованием ДДО разработана компьютерная программа в среде «Lazarus» на специализированном языке Free Pascal. Для моделирования динамических операторов в программе реализованы марковские процессы с дискретным множеством состояний.

Для анализа надежности автономных СДУ разработан вероятностный мультиматричный метод, позволяющий учитывать изменения величины солнечной радиации, а также отказы и режимы работы элементов, входящих в состав СДУ (рисунок 4).

Режимы работы ФЭП определяются интенсивностью поступающей на поверхность панели солнечной радиации, которая постоянно изменяется во времени.

Величина солнечной радиации учитывается путем использования актинометрических данных для конкретного местоположения СДУ. Большой объем данных о солнечной радиации затрудняет выполнение практических исследований по оценке надежности, поэтому полученные актинометрические данные для конкретного местоположения СДУ необходимо сгруппировать. Эта процедура выполняется путем объединения близко лежащих среднесуточных значений солнечной радиации по месяцам года и получения их среднего значения.

Таким образом, мультиматричный метод оценки надежности СДУ позволяет использовать мульти-модель солнечной радиации с несколькими состояниями $T_1, T_2, T_3, \dots, T_p$ ($p=1, 2, 3, \dots, l$).

Для каждого из рассматриваемых мульти-состояний назначаются: режим работы СДУ по полной схеме $j=0$ и ремонтные режимы работы установки

$j=1, \dots, m$, отличающиеся составом и вероятностью повреждения оборудования $i=1, \dots, n$.

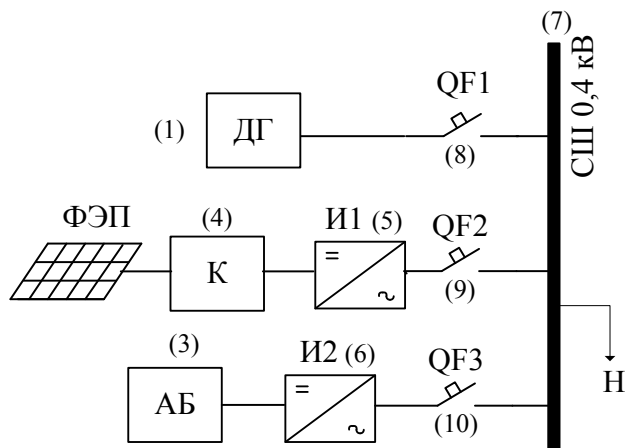


Рисунок 4 – Схема автономной СДУ: ФЭП – блок фотоэлектрических преобразователей; К – конвертор; И1, И2 – инвертор; АБ – банк аккумуляторных батарей; QF1, QF2, QF3 – автоматические выключатели 0,4 кВ

В процессе расчетов необходимо сформировать матрицы логических связей отказов, режимов и аварий, фиксирующих какие отказы к какой аварии приводят в каждом из режимов, для каждого состояния T_p .

Вывод расчетных выражений для частоты и длительности аварий основан на последовательном применении формулы полной вероятности при рассмотрении множества возможных конъюнкций.

Вероятность аварии k -го вида в j -м режиме связана с вероятностью отказа какого-либо i -го элемента из n

$$P_{kj} = \sum_{i=1}^n P(ji)P(k/ji), \quad (13)$$

где $P(ji)$ – вероятность отказа i -го элемента в j -м режиме, $P(k/ji)$ – вероятность возникновения аварии k -го вида при условии отказа i -го элемента в j -м режиме.

В предположении безотказной работы устройств релейной защиты и правильных действий персонала, расчет частоты или среднего параметра событий (аварий) k -го вида осуществляется по формуле

$$\Lambda(k) = \frac{T_p}{8760} \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n q_{ji} \lambda_{ji} L(j, i, k); \quad (14)$$

$$L(j, i, k) = \begin{cases} 1, & \text{если } j \cap i = k \\ 0, & \text{если } j \cap i \neq k \end{cases}$$

где q_{ji} – относительная длительность j -го режима, λ_{ji} – частота отказов i -го элемента схемы, $L(j, i, k)$ – условная вероятность, являющаяся логической функцией для k -й аварии.

Среднее время восстановления работы СДУ после аварии k -го вида определяется как математическое ожидание по всей совокупности соответствующих конъюнкций по выражению

Последствия отказов элементов установки в различных режимах проявляются как аварии с определенной степенью нарушения работоспособности СДУ: потеря ФЭП, ДГ, банка АБ, инвертора и т. д. Анализ надежности схемы СДУ осуществляется с помощью формализованной записи логических связей конъюнкций $j \cap i$ с их результатом – авариями того или иного вида $k = 1, 2, 3 \dots l$.

$$\tau(k) = \frac{1}{\Lambda(k)} \left(\sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n q_i \lambda_{ji} \tau(j, i, k) L(j, i, k) \right), \quad (15)$$

где $\tau(j, i, k)$ – время восстановления нормального функционирования установки после аварии k -го вида в j -м режиме при отказе i -го элемента.

Среднее значение аварийной недовыработки энергии СДУ в течение длительности состояния T_p вычисляется по формуле

$$\Delta W_p = T_p \sum_k^n \Lambda(k) \tau(k) \Delta N(k), \quad (16)$$

где $\Delta N(k)$ – величины аварийных снижений мощности при авариях k -го вида с длительностью их существования $\tau(k)$, кВт.

Для реализации предложенного метода разработана компьютерная программа в среде «GUIDE», входящая в состав пакета программ «MATLAB». Формирование массива конъюнкций $\{j \cap i\}$ осуществляется программой, в которой для идентификации аварий используется топологический метод проверки связности узлов схемы электрических соединений СДУ. При этом схема представляется в виде графа, где узлами являются ДГ, ФЭП, АБ, сборные шины 0,4 кВ и отходящие линии, а ветвями – электрическая связь между ними.

При оценке надежности ЭК, включающих ВЭУ, ФЭП и ДГ (рисунок 5), возникают трудности, связанные с различными принципами функционирования оборудования системы генерации. Для расчета надежности таких установок предлагается модель объединенной системы, которая включает в себя три взаимосвязанные системы с энергоблоками, состоящими из ВЭУ, ФЭП и ДГ, различающимися по номинальной мощности и показателям надежности.

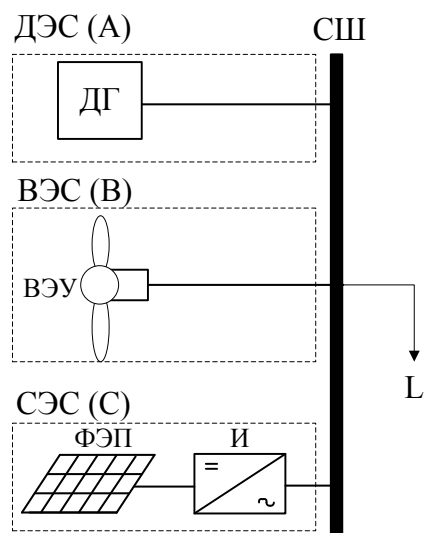


Рисунок 5 – Схема автономной солнечно-ветро-дизельной системы генерации: ДЭС – дизельная электростанция (А); ВЭС – ветроэлектростанция (В); СЭС – солнечная электростанция (С); L – нагрузка

всем множестве значений $\{S_A(k)\}$, $\{S_B(j)\}$, $\{S_C(i)\}$ с помощью вероятностных моделей.

Представленная схема гибридного ЭК предусматривает объединение различных источников электроэнергии на шине переменного тока. В состав ВЭС и СЭС могут входить ряд агрегатов с изменяющейся мощностью в зависимости от погодных условий.

Таким образом, три системы А, В, С с установленной мощностью Z_A , Z_B , Z_C объединены в концентрированную систему U. Распределения вероятностей состояний каждой системы с располагаемой мощностью $P[S_A(k)]$, $P[S_B(j)]$, $P[S_C(i)]$ могут быть получены на

Множество состояний системы U со своими значениями мощности $S(u)$ представляется с помощью матрицы размером $n_A \times n_B \times n_C$, где n_A, n_B, n_C – числа состояний располагаемой мощности систем. Комбинации возможных состояний мощности трех систем представлены на рисунке 6 в виде трехмерной диаграммы.

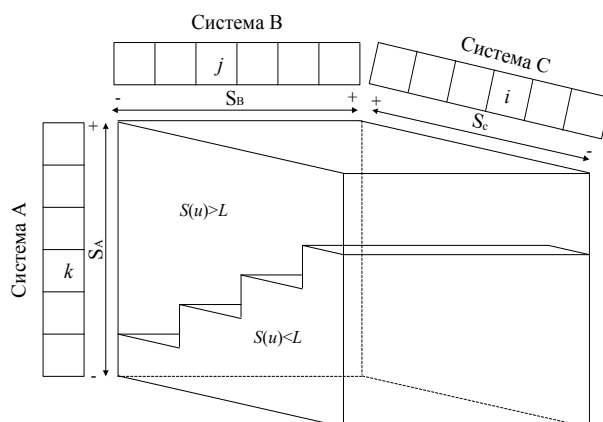


Рисунок 6 – Диаграмма объединенных состояний мощности систем A, B и C

Определение величин мощности объединенной системы $S(u)$ при различных сочетаниях $\{S_A(k)\}, \{S_B(j)\}, \{S_C(i)\}$ при постоянной нагрузке L производится по формуле

$$S(u) = S_A(k) + S_B(j) + S_C(i) - L. \quad (17)$$

Вычисление вероятностей значений $S(u)$ выполняется по выражению

$$P[S(u)] = \sum_k \sum_j \sum_i [P[S_A(k)]P[S_B(j)]P[S_C(i)]B(k, j, i, u)]; \quad (18)$$

$$B(k, j, i, u) = \begin{cases} 1, & \text{если } S(k, j, i) = S(u), \\ 0, & \text{если } S(k, j, i) \neq S(u), \end{cases}$$

где $S(k, j, i)$ – элемент трехмерной матрицы на пересечении k -ой строки, j -го столбца и i -ой строки.

Математическое ожидание дефицита мощности при снижении располагаемой мощности в системе

$$M[D] = \sum_u P[S(u)] \cdot D(u), \quad (19)$$

где $D(u)$ – величина дефицита мощности в объединенной системе при $S(u) < L$.

Среднегодовой недоотпуск электроэнергии потребителям

$$\Delta W = 8760 \cdot M[D]. \quad (20)$$

Для реализации предложенного метода разработана компьютерная программа в среде «Delphi», входящая в состав пакета программ «Embarcadero RAD Studio».

В третьей главе проведен анализ критериев экономической эффективности автономных ЭК, использующих ветровую и/или солнечную энергию. Применяемые в большинстве работ критерии не позволяют учесть надежность работы оборудования АСГ на основе ВИЭ, что влияет на достоверность полученных результатов. Учет событий и процессов, возникающих в реальной эксплуа-

тации (погодные условия, аварийные отказы и послеаварийные ремонты оборудования), позволяет уточнить значения технико-экономических показателей.

В качестве критерия выбора оптимального технического решения принимается минимум приведенных затрат, позволяющий учитывать различные виды затрат, связанные с необходимыми инвестициями и эксплуатацией АСГ совместно с затратами за не поставленную энергию потребителям из-за перерывов в электроснабжении (ущерб).

Приведенные затраты АСГ на основе ВИЭ с учетом надежности определяются по формуле

$$Z = E_n \cdot K_{\Sigma} + I_{\Sigma} + Y \rightarrow \min, \quad (21)$$

где E_n – норма дисконтирования, принимаемая равной ключевой ставке ЦБ РФ; K_{Σ} – единовременные капитальные затраты; I_{Σ} – суммарные эксплуатационные издержки; Y – годовой ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям.

Математическое ожидание ущерба можно рассматривать как затраты, обусловленные аварийным перерывом электроснабжения. Математическое ожидание ежегодного экономического ущерба от недоотпуска электроэнергии определяется с помощью оценок удельного ущерба

$$Y = y_0 \cdot \Delta W, \quad (22)$$

где y_0 – удельный ущерб для различных групп потребителей, руб./кВт·ч; ΔW – годовая недовыработка электроэнергии системой генерации.

Окончательный вариант проектного решения определяется путем технико-экономического сравнения. Различие вариантов по затратам с учетом ущерба начинается при различии оценок затрат не менее чем на 15%. В случае равнозначности вариантов по критерию приведенных затрат необходим выбор технического решения в условиях многокритериальности.

Многокритериальные задачи оптимизации решаются на основе представления АСГ на основе ВИЭ сложной системой, для которой характерны множество целей функционирования.

Для большинства задач оптимизации АСГ на основе ВИЭ характерен набор частных критериев: себестоимость 1 кВт установленной мощности, количество электроэнергии выработанной АСГ за год, денежный эквивалент «вытесненному» дизельному топливу, срок окупаемости проекта, ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителю.

Себестоимость 1 кВт установленной мощности от комбинированной системы генерации на основе ВИЭ определяется по уточненной формуле

$$C_{\text{комб}} = \frac{W_{\text{ВИЭ}}^{\text{факт}} \cdot C_{\text{ВИЭ}} + (W_{\text{общ}} - W_{\text{ВИЭ}}^{\text{факт}}) \cdot T_{\text{ДЭС}}}{W_{\text{общ}}}, \quad (23)$$

где $W_{\text{ВИЭ}}^{\text{факт}} = W_{\text{ВИЭ}}^{\text{ОЖ}} - \Delta W_{\text{ВИЭ}}$ – фактическая выработка электроэнергии ВИЭ; $W_{\text{ВИЭ}}^{\text{ОЖ}}$ – ожидаемая выработка электроэнергии ВИЭ; $\Delta W_{\text{ВИЭ}}$ – недовыработка электроэнергии ВИЭ; $C_{\text{ВИЭ}}$ – себестоимость электроэнергии от ВИЭ; $W_{\text{общ}}$ – общее потребление электроэнергии населенным пунктом; $T_{\text{ДЭС}}$ – существующий отпускной тариф ДЭС.

Срок окупаемости АСГ на основе ВИЭ, T_{OK} , рассчитывается, исходя из предложения, что электрическая энергия от ВИЭ на период окупаемости отпускается по текущему тарифу на электроэнергию для конкретного потребителя

$$T_{OK} = \frac{K_{\Sigma}}{(W_{ВИЭ}^{факт} \cdot T_{дЭС} - I_{ВИЭ})}. \quad (24)$$

Частный критерий – денежный эквивалент «вытесненному» дизельному топливу, учитывающий отказы ВИЭ как по техническим причинам, так и по причине погодных условий имеет вид

$$Z_{дТ} = Ц_{дТ} \cdot (W_{ВИЭ}^{ОЖ} - \Delta W_{ВИЭ}) \cdot 0,3, \quad (25)$$

где $Ц_{дТ}$ – стоимость дизельного топлива в конкретных населенных пунктах с учетом доставки и хранения топлива.

Для формирования оценок весомости частных критериев v_i могут быть использованы различные методы экспертных оценок: методы непосредственной оценки, ранговой корреляции, последовательных сопоставлений, модификации частичного и парного сравнения и т. д.

Многокритериальный выбор заключается в свертке нескольких критериев в единый. В квалиметрии для комплексной оценки применяются различные формы свертки:

среднеарифметическая линейная форма свертки имеет вид

$$F_{ср.А}^* = \sum_{i=1}^n v_i e_{ij} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad (26)$$

мультипликативная форма

$$F_{М}^* = \prod_{i=1}^n (e_{ij})^{v_i} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad (27)$$

средняя гармоническая форма свертки

$$F_{Г}^* = \left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{e_{ij}} \right)^{-1} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1, \quad (28)$$

где F^* – оценочный функционал, представленный единым скалярным критерием; e_{ij} – эффективность i -го частного критерия в j -м варианте; n – число частных критериев оценки в рассматриваемой задаче; v_i – весовой коэффициент.

В качестве оптимального варианта схемы АСГ на основе ВИЭ выбирается тот, у которого достигается наибольшая оценка эффективности по выражениям (26)-(28).

В четвертой главе представлены результаты расчета надежности функционирования и технико-экономической оценки АСГ на основе ВИЭ для трех населенных пунктов Красноярского края. Рассматриваемые АСГ функционируют на территориях с различными солнечными и ветровыми ресурсами, определяющими их состав.

В качестве примера применения ВДК рассмотрена децентрализованная система электроснабжения поселка Воронцово Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района. Поселок является перспективными для строительства ВДК в связи с высоким ветроэнергетическим потенциалом и наличием энергодефицита. Среднегодовая скорость ветра составляет 7,1 м/с. С

учетом графика нагрузки поселка, годовое потребление энергии составляет 896,94 МВт·ч, зимний максимум нагрузки $P_{\max} = 600$ кВт. Существующий тариф на электрическую энергию – 21,15 руб./кВт·ч.

Рассмотрены три возможных варианта схем системы электроснабжения поселка Воронцово с различными компоновками энергоисточников и возможностью аккумулирования энергии. В таблице 1 представлены состав, установленная мощность генерирующего оборудования и рассчитанные методом ДДО интегральные показатели надежности ВДК.

Таблица 1 – Состав генерирующего оборудования и результаты расчета надежности вариантов схем ВДК для поселка Воронцово

Вариант состава ВДК	Мощность/энергия установленного оборудования ВДК, N , кВт/кВт·ч				Годовая ожидаемая выработка э/э элементами, $W_{ож}$, кВт·ч/год		Интегральные показатели надежности	
	ВЭУ	ДГ	ДГР	АБ	ВЭУ	ДГ	Годовая недовыработка э/э ВДК, ΔW , кВт·ч/год	Годовой ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителю, $У$, тыс. руб.
1	3x120	750	750	2400	587 016,4	309 924	171 783,7	5 668,9
2	2x150	2x375	750	1600	595 986,6	300 953	143 463,6	4 734,3
3	1x300	1x150; 1x250; 1x350	-	-	625 551,6	271 388	150 057,5	4 951,9

На основании данных таблицы 1 произведен расчет технико-экономических показателей различного состава ВДК с учетом надежности, результаты которого приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов технико-экономических показателей для различных вариантов схем ВДК

Технико-экономические показатели	Варианты состава ВДК		
	1	2	3
Количество и мощность ВЭУ, кВт	3x120	2x150	1x300
Кол-во и мощность рабочего ДГ, кВт	1x750	2x375	1x150;1x250;1x350
Кол-во и мощность резервного ДГ, кВт	1x750	1x750	-
Энергоемкость АБ, кВт·ч	2400	1600	-
Суммарные капитальные затраты, K_{Σ} , тыс. руб.	92 881,9	64 940,4	35 368,2
Суммарные эксплуатационные издержки, I_{Σ} , тыс. руб.	11 134,4	9 231,1	7 447,8
Себестоимость э/э от ВДК, $C_{ВДК}$, руб./кВт·ч	14,76	12,43	11,33
Денежный эквивалент "вытесненному" топливу, $Z_{дт}$, тыс. руб.	5 596,9	6 103,0	6 407,8
Годовой ущерб от недоотпуска электроэнергии, тыс. руб.	5 668,86	4 734,3	4 951,9
Приведенные затраты, Z , тыс. руб.	27 020,3	21 108,9	16 290,2

Результаты технико-экономических расчетов показывают, что наиболее эффективным техническим решением автономного ВДК для поселка Воронцово является состав оборудования, включающий одну ВЭУ мощностью 300 кВт, три рабочих ДГ мощностью 150, 250 и 350 кВт. Приведенные затраты оптимального варианта с учетом ущерба различаются с двумя другими вариантами схем на 39,7 и 22,8 %.

Годовая недовыработка электроэнергии с учетом изменения погодных условий, а также влияния аварийных отказов и ремонтов оборудования для оптимального варианта автономного ВДК составляет 16,7% от годового потребления электроэнергии.

На рисунке 6 показаны результаты сравнения технико-экономических показателей без учета и с учетом надежности для оптимального варианта состава ВДК в поселке Воронцово.

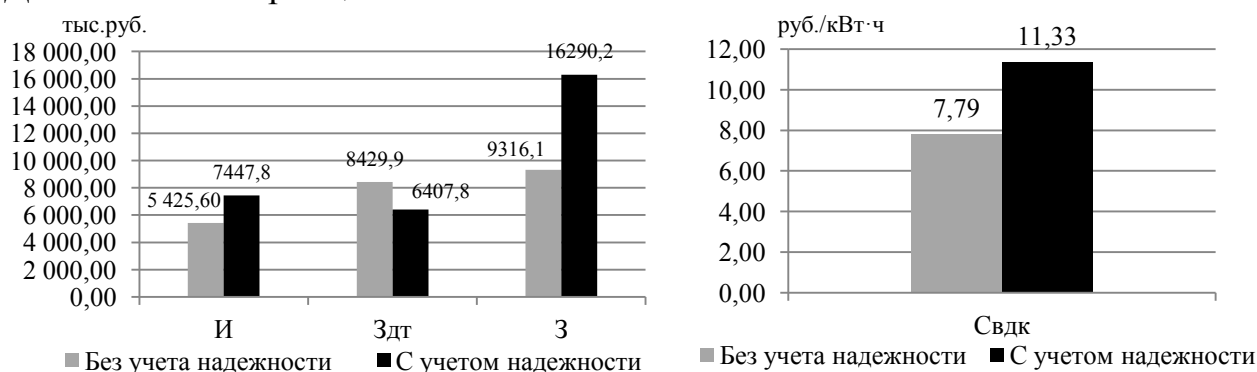


Рисунок 6 – Результаты сравнения технико-экономических показателей для оптимального варианта ВДК в поселке Воронцово

Сравнение полученных результатов показывают, что учет надежности дает более точную оценку ожидаемых результатов. Так полученные значения приведенных затрат с учетом надежности для оптимального варианта автономного ВДК увеличились на 42,8 % и составили 16290,2 тыс. руб. (по сравнению с расчетом без учета надежности – 9316,1 тыс. руб.). Стоимость произведенного кВт·ч увеличилась на 31,2 % и составила 11,33 р./кВт·ч по сравнению с аналогичной стоимостью, рассчитанной без учета надежности – 7,79 руб./кВт·ч.

В качестве примера применения СДУ рассмотрена децентрализованная система электроснабжения деревни Шадрино Енисейского района Красноярского края, перспективная для солнечной энергетики. Среднегодовое солнечное излучение составляет 1022 кВт·ч/м². Потребление электрической энергии в год составляет 38,7 МВт·ч, зимний максимум нагрузки $P_{max}=22$ кВт. Существующий тариф на электрическую энергию – 42 руб./кВт·ч.

Для расчетов использованы данные о приходе солнечной радиации с актинометрической станции г. Енисейск. Рассмотрены три возможных варианта схем СДУ с различными компоновками энергоисточников и возможностью аккумуляции. В таблице 3 приведены варианты состава, установленная мощность генерирующего оборудования и рассчитанные мультиматричным методом интегральные показатели надежности СДУ.

Таблица 3 – Состав генерирующего оборудования и результаты расчета надежности вариантов схем СДУ для деревни Шадрино

Вариант состава СДУ	Мощность/энергия установленного оборудования СДУ, кВт/кВт·ч			Годовая ожидаемая выработка э/э элементами СДУ, $W_{ож}$, кВт·ч/год		Интегральные показатели надежности	
	ФЭП	ДГ	АБ	ФЭП	ДГ	$\Delta W_{сду}$, кВт·ч/год	У, тыс. руб.
1	17,92	1x30	2400	6 845,2	31 121,4	1 402,5	46,3
2	18,24	2x15	1200	6 833,5	32 066,5	369,2	12,2
3	18	2x15	480	7 778,6	32 054,8	267,9	8,8

Результаты расчетов технико-экономических показателей с учетом надежности различных вариантов СДУ для деревни Шадрино представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов технико-экономических показателей различных вариантов СДУ

Технико-экономические показатели	Варианты состава СДУ		
	1	2	3
Количество и мощность блоков ФЭП, кВт	1x17,92	2x9,12	3x6
Количество и мощность рабочего ДГ, кВт	1x30	2x15	2x15
Энергоемкость АБ, кВт·ч	480	1200	2400
Суммарные капитальные затраты, $K_{с}$, тыс. руб.	2 387,8	4 483,9	4 974,3
Суммарные издержки, $I_{с}$, тыс. руб.	518,2	605,4	624,6
Себестоимость э/э от СДУ, $C_{сду}$, руб./кВт·ч	36,6	38,5	38,6
Денежный эквивалент "вытесненному" топливу, $Z_{дт}$, тыс. руб.	95,2	88,6	88,2
Приведенные затраты, Z , тыс. руб.	827,1	1110,8	1180,7

Технико-экономический расчет показывает, что наиболее эффективным техническим решением автономной СДУ для деревни Шадрино является состав оборудования, включающий один массив ФЭП мощностью 17,92 кВт (56 модулей марки ФСМ-320М), одного ДГ мощностью 30 кВт и блока АБ с аккумулируемой энергией 480 кВт·ч.

Приведенные затраты оптимального варианта (827,1 тыс.руб.) с учетом ущерба различаются с двумя другими вариантами на 25,5 и 29,9 %. Однако ущерб от ненадежности оптимального варианта выше по сравнению с двумя другими структурными вариантами СДУ. Уменьшение ущерба возможно за счет увеличения уровня надежности системы (установка дополнительного оборудования или оборудования с лучшими показателями надежности).

Годовая недовыработка электроэнергии с учетом изменения погодных условий, а также влияния аварийных отказов и ремонтов оборудования для оптимального варианта автономной СДУ составляет 3,62 % от годового потребления электроэнергии.

В качестве примера применения гибридного ЭК на основе ВЭУ, ФЭП и ДГ рассмотрена децентрализованная система электроснабжения поселка Арадан Ермаковского района Красноярского края, перспективного для ветровой и солнечной энергетики. Среднегодовое солнечное излучение в данной местности составляет $1205 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, средняя годовая скорость ветра изменяется от 4 до 7 м/с. Годовое потребление энергии поселком составляет 402,07 МВт·ч, зимний максимум нагрузки $P_{\text{max}}=300 \text{ кВт}$. Существующий тариф на электрическую энергию – 22 руб./кВт·ч.

Предлагается три варианта схем солнечно-ветро-дизельного ЭК с различными компоновками энергоисточников и возможностью аккумулирования энергии. В таблице 5 приведены варианты состава генерирующего оборудования и рассчитанный с помощью модели надежности объединенной системы генерации годовой недоотпуск электроэнергии.

Таблица 5 – Состав генерирующего оборудования и годовой недоотпуск электроэнергии для поселка Арадан

Вариант состава ЭК	Мощность установленного оборудования ЭК, кВт			Годовая ожидаемая выработка э/э элементами ЭК, $W_{\text{ож}}, \times 10^3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$			Годовой недоотпуск электроэнергии при отказе различного кол-ва генерирующих блоков ΔW , кВт·ч/год					
	ДЭС	ВЭС	СЭС	ДЭС	ВЭС	СЭС	2	3	4	5	6	
1	2x150	2x100	240	33,9	244,5	123,8	843	2173	3252	3136	913	
2	1x300	4x50	240	53,5	222,0	126,6	803	1473	1188	550	115	
3	4x75	1x200	240	105,3	183,4	113,4	0	609	502	595	313	

На основании данных таблицы 5 произведен расчет технико-экономических показателей гибридного ЭК с учетом годового недоотпуска электроэнергии при отказе генерирующих блоков, результаты которого приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты расчетов технико-экономических показателей гибридного ЭК в поселка Арадан

Технико-экономические показатели	Варианты состава ЭК		
	1	2	3
Количество и мощность ВЭУ, кВт	2x100	4x50	1x200
Количество и мощность блок ФЭП, кВт	4x60	4x60	4x60
Количество и мощность ДГ, кВт	2x150	1x300	4x75
Суммарные капитальные затраты, K_{Σ} , тыс. руб.	42 629, 5	43 167,8	57 088,8
Суммарные издержки, I_{Σ} , тыс. руб.	2 131, 5	2 158,4	2 854,4
Недоотпуск электроэнергии при отказе 4-х генерирующих агрегатов, ΔW , кВт·ч/год	3 252	1188	502
Ущерб от недоотпуска электроэнергии при отказе 4-х генерирующих агрегатов, тыс. руб	107,3	39,2	16,6
Приведенные затраты, Z , тыс. руб.	6 928,0	6 946,1	9 150,7

Приведенные затраты с учетом ущерба для первого и второго вариантов схем АСГ на основе ВИЭ для поселка Арадан отличаются на 0,26 %, то есть рассматриваемые варианты попадают в зону неопределенности. В этом случае

для обоснованного выбора оптимального технического решения применим комплексный критерий эффективности. При выборе в этих условиях варианта схемы сформулируем критериальные свойства (КС), которым должны удовлетворять сравниваемые варианты (таблица 7).

Таблица 7 - Сравнение вариантов схем по КС

Варианты схемы	КС1	КС2	КС3	КС4	КС5
	Приведенные затраты без учета ущерба, тыс.руб.	Ущерб, тыс.руб.	Себестои- мость э/э, руб./кВт·ч	Денежный экви- валент объему «вытесненного» дизельного топ- лива, тыс. руб.	Срок окупае- мости, лет
1	6820,7	107,3	6,08	4918,0	5,58
2	6906,9	39,2	7,29	4681,7	6,00
3	9134,2	16,6	7,55	4955,1	7,63

Применим метод ранговой корреляции для формирования оценок весомости КС. Получим оценки эффективности вариантов по каждому из рассматриваемых КС и комплексные оценки эффективности вариантов, рассчитанные для среднеарифметической $F_{\text{ср.А}}^*$ и гармонической F_{Γ}^* форм (таблица 8).

Таблица 8 – Комплексная оценка эффективности вариантов схем АСГ на основе ВИЭ для поселка Арадан

Варианты схем	Оценки e_{ij} при КС					Комплексные оценки эффек- тивности	
	КС1	КС2	КС3	КС4	КС5		
	Весовые коэффициенты v_i КС					$F_{\text{ср.А}}^*$	F_{Γ}^*
	0,231	0,172	0,244	0,119	0,224		
1	1	0	1	0,136	0	0,49	0
2	0,67	0,75	0,67	1	0,21	0,61	0,47
3	0,33	1	0,33	0	1	0,55	0

Анализ результатов сравнения вариантов схем по комплексному критерию эффективности позволяет выбрать второй вариант схемы АСГ на основе ВИЭ для поселка Арадан, у которого большие значения $F_{\text{ср.А}}^*$ и F_{Γ}^* .

Годовой недоотпуск электроэнергии с учетом изменения погодных условий, а также влияния аварийных отказов и ремонтов оборудования для оптимального варианта гибридного ЭК на основе ВЭУ, ФЭП и ДГ составляет около 1 % от годового потребления электроэнергии поселком.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Усовершенствован логико-вероятностный метод для оценки надежности автономного ветродизельного комплекса на основе ДДО, позволяющий учитывать изменения погодных условий, аварийные отказы и послеаварийные

ремонт оборудования путем введения динамических операторов, реализуемых с помощью марковских моделей. Данный метод отражает последовательность происходящих событий, зависимые процессы отказов, состояния резервных элементов ВДК.

2. Предложен и реализован вероятностный мультиматричный метод для расчета надежности автономной СДУ, учитывающий стохастический характер солнечной радиации, режимы работы и отказы оборудования. Сформулирована целесообразность дифференциации величин поступления солнечной энергии в течение года на мульти-состояния.

3. Разработана модель надежности объединенной солнечно-ветродизельной системы, позволяющая оценить математическое ожидание дефицита мощности при снижении располагаемой мощности в системе и среднегодовой недоотпуск электроэнергии потребителям при отказах генерирующих элементов с учетом погодных условий.

4. Создан комплекс компьютерных программ, реализующих разработанные методы оценки надежности АСГ на основе ВИЭ.

5. Проведена оценка надежности проектируемых АСГ на основе ветровой и/или солнечной энергии для территории Красноярского края. Выявлено, что годовая ожидаемая выработка электроэнергии АСГ на основе ВИЭ отличается от реальной выработки электроэнергии, что вызвано неблагоприятными погодными условиями, аварийными отказами и послеаварийными ремонтами оборудования системы генерации. Так годовая недовыработка электроэнергии автономного ВДК составляет от 16 до 19 % от годового потребления электроэнергии поселком, автономной СДУ – от 2 до 5%; гибридного ЭК на основе ВЭУ, ФЭП и ДГ – от 1 до 2 %.

6. Выполнена оценка экономической эффективности различных вариантов схем АСГ на основе ВИЭ с учетом надежности для территории Красноярского края. Сравнение полученных результатов с учетом и без учета надежности показывает, что учет событий и процессов, возникающих в реальной эксплуатации АСГ на основе ВИЭ, дает более точную оценку ожидаемых результатов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Кривенко, Т.В.** Анализ надежности автономного ветродизельного комплекса / О.А. Григорьева, Т.В. Кривенко, В.А. Тремясов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – №2(243). – С.45-52.

2. **Кривенко, Т.В.** Мультиматричная модель для оценки надежности автономной энергоустановки на основе фотоэлектрического преобразователя / В.А. Тремясов, Т.В. Кривенко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2017. – №1(23). – С. 9-17.

3. **Кривенко, Т.В.** Метод оценки надежности ветродизельной установки с применением динамического дерева отказов / В.А. Тремясов, Т.В.

Кривенко // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2017. – №3(10). – С.414-425.

Публикации в других изданиях:

4. **Кривенко, Т.В.** Оценка показателей надежности ветроэнергетических установок и ветропарков / Т.В. Кривенко // Молодежь и наука: сборник материалов X юбилейной Всероссийской технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск: СФУ, 2014. – С.679-682.

5. **Кривенко, Т.В.** Оценка надежности системы генерации малых ГЭС в изолированных энергосистемах / В.А. Тремясов, К.В. Кенден, Т.В. Кривенко // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск, 2015. – С.143-148.

6. **Кривенко, Т.В.** Оптимизация структуры автономных солнечно-дизельных установок с аккумулярованием электроэнергии / В.А. Тремясов, К.В. Кенден, Т.В. Кривенко // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск, 2015. – С.148-153.

7. **Кривенко, Т.В.** Определение выработки электроэнергии фотоэлектрической установкой с учетом графика нагрузки / В.А. Тремясов, К.В. Кенден, Т.В. Кривенко // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск, 2015. – С.472-477.

8. **Кривенко, Т.В.** Оптимизация профилактического обслуживания оборудования ВЭУ / В.А. Тремясов, А.В. Бобров, Т.В. Кривенко // Энергия: экономика, техника, экология. – 2016. – №5. – С.19-24.

9. **Кривенко, Т.В.** Математическая модель надежности автономной ветродизельной системы на основе метода дерева отказов / Т.В. Кривенко // Молодежь и XXI век – 2016: материалы VI Международной молодежной научной конференции, в 4-х томах, Т.4. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. – С. 263-266.

10. **Кривенко, Т.В.** Анализ надежности автономного гибридного энергокомплекса на основе возобновляемых источниках энергии / В.А. Тремясов, Т.В. Кривенко // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2017. – № 1. – С. 43-51.

11. **Кривенко, Т.В.** Расчет надежности солнечно-дизельной установки в изолированной энергосистеме / Т.В. Кривенко, А.В. Богданов // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: сборник статей XIV международной научно-практической конференции. – Пенза, 2018. – С.24-28.

12. **Кривенко, Т.В.** Теория надежности в энергетике. Надежность систем генерации, использующих ветровую и солнечную энергию: учеб. пособие / В.А. Тремясов, Т.В. Кривенко. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 164 с.