

На правах рукописи

Зограф Яна Евгеньевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.14.02 – электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

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

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
Тремясов Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Федеральное государственное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский
федеральный университет»

Защита диссертации состоится _____ 20 г. В ____ часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.404.12 при Сибирском федеральном университете по адресу: г. Красноярск, ул. Киренского, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 20 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В Российской Федерации существует множество децентрализованных населенных пунктов, где для электроснабжения используют дизельные электростанции (ДЭС). В соответствии с положениями Энергетической стратегии России на период до 2035 года приоритетным направлением является наращивание новых генерирующих мощностей, работающих на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а также развитие связанной с такими источниками научно-технической базы с использованием современных передовых технологий.

Ключевые проблемы, связанные с использованием ДЭС в качестве основного источника энергии, обусловлены сложностью доставки дизельного топлива, его дороговизной, непостоянством поставок. Комплектование подобных автономных энергосистем фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП), ветроэнергетическими установками (ВЭУ) в сочетании с аккумуляторными батареями (АБ) и ДЭС позволит обеспечивать достаточную, надёжную и эффективную выработку электроэнергии (э/э), повышая тем самым качество жизни населения изолированных регионов и заметно снижая стоимость э/э.

Степень разработанности. Несмотря на большое разнообразие методов анализа надёжности и риска систем генерации с использованием ВИЭ, в них присутствуют недостатки или неучтенные факторы, такие как неопределенность исходных статистических данных, влияние стохастичности погодных условий на функционирование генерирующего оборудования на базе ВИЭ.

Также выявлены недостатки в применяемых методиках и алгоритмах оптимизации конфигурации автономных систем генерации с ВИЭ, например, использование среднемесячных или среднегодовых значений скорости ветра и инсоляции, а также не универсальность программно-вычислительных комплексов.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о необходимости разработки и совершенствования моделей и методик оценки надёжности и риска автономных систем генерации с использованием ВИЭ, алгоритмов их оптимизации.

Объектом исследования являются автономные системы генерации с ВИЭ.

Предмет исследования – надёжность, риск и конфигурация АСГ на основе ВИЭ при их проектировании в условиях неопределённости исходных данных.

Цель диссертационной работы состоит в усовершенствовании методик проектирования автономных систем генерации на базе нетрадиционных источников энергии.

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

1. Проанализировать существующие в настоящее время методы оценки надёжности и риска и оптимизации систем генерации с ВИЭ с выделением недостатков и неучтённых факторов.

2. Разработать алгоритм оптимизации состава систем генерации с ВИЭ, позволяющий учесть стохастичность энергоресурсов при выработке различными типами ВИЭ.

3. Представить методику количественной оценки риска в системах генерации с ВИЭ с использованием диаграмм причина-последствие.

4. Показать математическую модель для оценки надёжности энергокомплексов с ВИЭ, учитывающую отказы общей причины.

5. Реализовать на практике предложенные модели и методы при вводе ветро-, и солнечных мощностей в автономных системах электроснабжения Восточной и Западной Сибири.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Представлена методика оценки технологического риска при использовании ВИЭ, основанная на применении диаграмм причина-последствие.

2. Разработан алгоритм оптимизации состава системы генерации с ВИЭ, отличающийся возможностью учёта стохастичности энергоресурсов при выработке различными типами ВИЭ.

3. Представлена математическая модель, позволяющая оценить надёжность энергокомплексов с ВИЭ и учитывающая отказы общей причины

Практическая значимость

Методы исследования. При подготовке работы применялись методы теории надёжности в энергетике, теория вероятностей, теория марковских процессов, методы многоцелевой оптимизации, теории принятия решений.

Апробация работы. Ключевые положения работы были доложены и обсуждены на: II Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Борисовские чтения - 2019» (Красноярск, 2019 г.); III Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Борисовские чтения - 2021» (Красноярск, 2021 г.); VII Всеросс. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электроэнергетики» (Нижний Новгород, 2021 г.); IX Всеросс. науч.-техн. конф. «Гидроэлектростанции в XXI веке» (Саяногорск; Черемушки, 2022 г.); LI Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием (с элементами научной школы для молодежи) «Фёдоровские чтения — 2022» (Москва, 2022 г.).

Публикации. По теме работы было опубликовано 10 печ. работ, из них 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 7 статей – в трудах Междунар. и Всеросс. науч.-техн. конференций, 1 статья в прочих изданиях.

Структура диссертационного исследования. Работа содержит введение, четыре главы, заключение, список использованных источников и приложения. Первая глава посвящена анализу методов оценки надёжности систем генерации с ВИЭ, выполнен анализ подходов к оценке рисков, связанных с созданием систем генерации с ВИЭ, проанализированы

эволюционные алгоритмы оптимизации состава систем генерации с ВИЭ и программно-вычислительные комплексы (ПВК). Приведено обоснование необходимости в разработке и развитии методик и моделей оценки надёжности и риска АСГ с ВИЭ, методов их оптимизации. Вторая глава посвящена методам и моделям оценки надёжности и риска систем генерации с ВИЭ. В третьей главе говорится о методах оптимизации состава АСГ с ВИЭ и принятии проектного решения при выборе схем систем в условиях неопределённости. В четвертой главе показана практическая реализация разработанных методик в условиях населённых пунктов на территории Сибири Российской Федерации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ существующих методов оценки надёжности и риска, методов оптимизации и соответствующих ПВК автономных систем генерации, содержащих ВИЭ.

2. Разработана методика на основе диаграммы «причина–последствия», которая представляет из себя сочетание деревьев событий и отказов, позволяющая количественно оценить риск проектов АСГ с ВИЭ.

3. Разработана методика для задач оптимизации компоновки автономных СДСГ, отличием которой является использование данных о выработке э/э ФЭП, а также учет переменчивости солнечной активности в течение суток и года.

4. Представлена математическая модель для оценки надёжности энергокомплексов с ВИЭ, учитывающая отказы, связанные с общей причиной.

5. Показана практическая реализация предложенных моделей и методов при вводе ветро-, и солнечных мощностей в автономных системах электроснабжения Западной и Восточной Сибири.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Zograf Y. E.** Risk assessment of renewable energy generation systems

projects / V. A. Tremyasov, Y. E. Zograf, T. V. Krivenko // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2020. – Т. 13(6). – P. 702-711.

2. **Zograf Y. E.** Optimal Planning of Solar-Diesel Generation System with

Energy Storage // V. A. Tremyasov, Y. E. Zograf, T. V. Krivenko // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2021. – Т. 14(1). – P. 42-54.

Публикации в других изданиях:

3. **Зограф Я. Е.** Математическая модель надёжности ветропарка с учетом отказов общей причины / В. А. Тремясов, Я. Е. Зограф // Борисовские

чтения: материалы II Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. – С. 30-34.

4. **Зограф Я. Е.** Оптимизация периодичности ремонтов ветроэнергетической установки / Я. Е. Зограф // Борисовские чтения: материалы II Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. – С. 34-37.

5. **Зограф Я. Е.** Оценка энергоёмкости аккумуляторной батареи в автономном энергокомплексе с возобновляемыми источниками энергии / Я. Е. Зограф // Борисовские чтения: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. – С. 106-110.

6. **Зограф Я. Е.** Модели нагрузки автономной системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии / В. А. Тремясов, Я. Е. Зограф, Е. Н. Лялина // Борисовские чтения: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. – С. 178-181.

7. **Зограф Я. Е.** Модель надёжности аккумуляторной батареи в системе генерации с возобновляемыми источниками энергии / В. А. Тремясов, Я. Е. Зограф // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. ст. – Н. Новгород: Нижегородский госуд. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2021. – С. 415-420.

8. **Зограф Я. Е.** Оценка параметров малой ГЭС на реке Большой Енисей республики Тыва / Я. Е. Зограф, В. А. Тремясов // Гидроэлектростанции в XXI веке: сб. материалов IX Всерос. науч.-практ. конф. – Саяногорск, Черемушки: Саяно-Шушенский филиал Сиб. федер. ун-та, 2022. – С. 201-209.

9. **Зограф Я. Е.** Интеллектуальная поддержка принятия решений при выборе структуры солнечно-дизельных электростанций / В. А. Тремясов, Т. В. Кривенко, Я. Е. Зограф // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – №3. – С. 12-18.

10. **Зограф Я. Е.** Оценка риска пожара на автономной гибридной солнечно-дизельной электростанции / Я. Е. Зограф, Т. В. Кривенко // Фёдоровские чтения: материалы LII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. Участием. — М.: Издательский дом МЭИ, 2022. — С. 338-345.

На правах рукописи



Зограф Яна Евгеньевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.14.02 – электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

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

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
Тремясов Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Федеральное государственное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский
федеральный университет»

Защита диссертации состоится _____ 20 г. В ____ часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.404.12 при Сибирском федеральном университете по адресу: г. Красноярск, ул. Киренского, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 20 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В Российской Федерации существует множество децентрализованных населенных пунктов, где для электроснабжения используют дизельные электростанции (ДЭС). В соответствии с положениями Энергетической стратегии России на период до 2035 года приоритетным направлением является наращивание новых генерирующих мощностей, работающих на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а также развитие связанной с такими источниками научно-технической базы с использованием современных передовых технологий.

Ключевые проблемы, связанные с использованием ДЭС в качестве основного источника энергии, обусловлены сложностью доставки дизельного топлива, его дороговизной, непостоянством поставок. Комплектование подобных автономных энергосистем фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП), ветроэнергетическими установками (ВЭУ) в сочетании с аккумуляторными батареями (АБ) и ДЭС позволит обеспечивать достаточную, надёжную и эффективную выработку электроэнергии (э/э), повышая тем самым качество жизни населения изолированных регионов и заметно снижая стоимость э/э.

Степень разработанности. Несмотря на большое разнообразие методов анализа надёжности и риска систем генерации с использованием ВИЭ, в них присутствуют недостатки или неучтенные факторы, такие как неопределенность исходных статистических данных, влияние стохастичности погодных условий на функционирование генерирующего оборудования на базе ВИЭ.

Также выявлены недостатки в применяемых методиках и алгоритмах оптимизации конфигурации автономных систем генерации с ВИЭ, например, использование среднемесячных или среднегодовых значений скорости ветра и инсоляции, а также не универсальность программно-вычислительных комплексов.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о необходимости разработки и совершенствования моделей и методик оценки надёжности и риска автономных систем генерации с использованием ВИЭ, алгоритмов их оптимизации.

Объектом исследования являются автономные системы генерации с ВИЭ.

Предмет исследования – надёжность, риск и конфигурация АСГ на основе ВИЭ при их проектировании в условиях неопределённости исходных данных.

Цель диссертационной работы состоит в усовершенствовании методик проектирования автономных систем генерации на базе нетрадиционных источников энергии.

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

1. Проанализировать существующие в настоящее время методы оценки надёжности и риска и оптимизации систем генерации с ВИЭ с выделением недостатков и неучтённых факторов.

2. Разработать алгоритм оптимизации состава систем генерации с ВИЭ, позволяющий учесть стохастичность энергоресурсов при выработке различными типами ВИЭ.

3. Представить методику количественной оценки риска в системах генерации с ВИЭ с использованием диаграмм причина-последствие.

4. Показать математическую модель для оценки надёжности энергокомплексов с ВИЭ, учитывающую отказы общей причины.

5. Реализовать на практике предложенные модели и методы при вводе ветро-, и солнечных мощностей в автономных системах электроснабжения Восточной и Западной Сибири.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Представлена методика оценки технологического риска при использовании ВИЭ, основанная на применении диаграмм причина-последствие.

2. Разработан алгоритм оптимизации состава системы генерации с ВИЭ, отличающийся возможностью учёта стохастичности энергоресурсов при выработке различными типами ВИЭ.

3. Представлена математическая модель, позволяющая оценить надёжность энергокомплексов с ВИЭ и учитывающая отказы общей причины

Практическая значимость

Методы исследования. При подготовке работы применялись методы теории надёжности в энергетике, теория вероятностей, теория марковских процессов, методы многоцелевой оптимизации, теории принятия решений.

Апробация работы. Ключевые положения работы были доложены и обсуждены на: II Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Борисовские чтения - 2019» (Красноярск, 2019 г.); III Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Борисовские чтения - 2021» (Красноярск, 2021 г.); VII Всеросс. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электроэнергетики» (Нижний Новгород, 2021 г.); IX Всеросс. науч.-техн. конф. «Гидроэлектростанции в XXI веке» (Саяногорск; Черемушки, 2022 г.); LI Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием (с элементами научной школы для молодежи) «Фёдоровские чтения — 2022» (Москва, 2022 г.).

Публикации. По теме работы было опубликовано 10 печ. работ, из них 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 7 статей – в трудах Междунар. и Всеросс. науч.-техн. конференций, 1 статья в прочих изданиях.

Структура диссертационного исследования. Работа содержит введение, четыре главы, заключение, список использованных источников и приложения. Первая глава посвящена анализу методов оценки надёжности систем генерации с ВИЭ, выполнен анализ подходов к оценке рисков, связанных с созданием систем генерации с ВИЭ, проанализированы

эволюционные алгоритмы оптимизации состава систем генерации с ВИЭ и программно-вычислительные комплексы (ПВК). Приведено обоснование необходимости в разработке и развитии методик и моделей оценки надёжности и риска АСГ с ВИЭ, методов их оптимизации. Вторая глава посвящена методам и моделям оценки надёжности и риска систем генерации с ВИЭ. В третьей главе говорится о методах оптимизации состава АСГ с ВИЭ и принятии проектного решения при выборе схем систем в условиях неопределённости. В четвертой главе показана практическая реализация разработанных методик в условиях населённых пунктов на территории Сибири Российской Федерации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ существующих методов оценки надёжности и риска, методов оптимизации и соответствующих ПВК автономных систем генерации, содержащих ВИЭ.

2. Разработана методика на основе диаграммы «причина–последствия», которая представляет из себя сочетание деревьев событий и отказов, позволяющая количественно оценить риск проектов АСГ с ВИЭ.

3. Разработана методика для задач оптимизации компоновки автономных СДСГ, отличием которой является использование данных о выработке э/э ФЭП, а также учет переменчивости солнечной активности в течение суток и года.

4. Представлена математическая модель для оценки надёжности энергокомплексов с ВИЭ, учитывающая отказы, связанные с общей причиной.

5. Показана практическая реализация предложенных моделей и методов при вводе ветро-, и солнечных мощностей в автономных системах электроснабжения Западной и Восточной Сибири.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Zograf Y. E.** Risk assessment of renewable energy generation systems

projects / V. A. Tremyasov, Y. E. Zograf, T. V. Krivenko // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2020. – Т. 13(6). – P. 702-711.

2. **Zograf Y. E.** Optimal Planning of Solar-Diesel Generation System with

Energy Storage // V. A. Tremyasov, Y. E. Zograf, T. V. Krivenko // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2021. – Т. 14(1). – P. 42-54.

Публикации в других изданиях:

3. **Зограф Я. Е.** Математическая модель надёжности ветропарка с учетом отказов общей причины / В. А. Тремясов, Я. Е. Зограф // Борисовские

чтения: материалы II Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. – С. 30-34.

4. **Зограф Я. Е.** Оптимизация периодичности ремонтов ветроэнергетической установки / Я. Е. Зограф // Борисовские чтения: материалы II Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. – С. 34-37.

5. **Зограф Я. Е.** Оценка энергоемкости аккумуляторной батареи в автономном энергокомплексе с возобновляемыми источниками энергии / Я. Е. Зограф // Борисовские чтения: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. – С. 106-110.

6. **Зограф Я. Е.** Модели нагрузки автономной системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии / В. А. Тремясов, Я. Е. Зограф, Е. Н. Лялина // Борисовские чтения: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. – С. 178-181.

7. **Зограф Я. Е.** Модель надежности аккумуляторной батареи в системе генерации с возобновляемыми источниками энергии / В. А. Тремясов, Я. Е. Зограф // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. ст. – Н. Новгород: Нижегородский госуд. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2021. – С. 415-420.

8. **Зограф Я. Е.** Оценка параметров малой ГЭС на реке Большой Енисей республики Тыва / Я. Е. Зограф, В. А. Тремясов // Гидроэлектростанции в XXI веке: сб. материалов IX Всерос. науч.-практ. конф. – Саяногорск, Черемушки: Саяно-Шушенский филиал Сиб. федер. ун-та, 2022. – С. 201-209.

9. **Зограф Я. Е.** Интеллектуальная поддержка принятия решений при выборе структуры солнечно-дизельных электростанций / В. А. Тремясов, Т. В. Кривенко, Я. Е. Зограф // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – №3. – С. 12-18.

10. **Зограф Я. Е.** Оценка риска пожара на автономной гибридной солнечно-дизельной электростанции / Я. Е. Зограф, Т. В. Кривенко // Фёдоровские чтения: материалы LII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. Участием. — М.: Издательский дом МЭИ, 2022. — С. 338-345.