

На правах рукописи

Батуева Дарья Евгеньевна



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С
АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ
КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт - Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Шклярский Ярослав Элиевич

Официальные оппоненты

Нос Олег Викторович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Проектирование технологических машин», профессор;

Сулов Константин Витальевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра «Электроснабжение и электротехника», заведующий кафедрой.

Ведущая организация – акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергосистемы Противоаварийное управление», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 24 сентября 2021 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Горного университета ГУ 212.224.14 адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, д.2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте: www.spmi.ru

Автореферат разослан 23 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Электроснабжение объектов на территории Арктики и Крайнего Севера является изолированным от Единой энергосистемы и осуществляется от автономных источников электроснабжения – дизель-генераторных установок (ДГУ). Особенности географических и климатических условий Арктической зоны способствуют повышению уровня технологических рисков и требуют адаптации оборудования. Реализация проектов, связанных с развитием децентрализованных энергосистем на основе ветроэнергетических установок (ВЭУ), для работы которых имеется значительных ветропотенциал, является перспективной задачей, если решить логистические и инфраструктурные проблемы. В исследовании рассматривается потребление электрической энергии, выдаваемой генераторами ДГУ и ВЭУ и получаемой потребителем с коммунально-бытовым характером нагрузки. Параллельная работа ВЭУ и ДГУ позволит покрыть пики электрической нагрузки, которые возникают вследствие перепадов температур.

Прогнозирование энергопотребления и генерации электроэнергии позволит повысить эффективность использования электротехнического комплекса и планирования режимов работы. Результаты использования известных методов прогнозирования могут обладать различной точностью, поскольку исследование связано с изменениями в процессе электропотребления объектом, типом нагрузки потребителей и внешними климатическими изменениями. Не все методы прогнозирования позволяют отразить влияние таких параметров, как сезонные условия и климатические изменения при формировании планируемого графика нагрузок и графика выработки электроэнергии ветроустановками в ветродизельном комплексе. Поэтому в электроэнергетике все чаще применяются методы машинного обучения и построение на основе таких алгоритмов прогнозных моделей.

Так, применение метода сингулярного спектрального анализа (*Singular Spectrum Analysis, SSA*) позволит установить взаимосвязь изменения внешних климатических факторов и работы электротехнического комплекса на уровне шумовых компонент и, впоследствии, определить методику построения прогноза

энергопотребления. Актуальность диссертационного исследования определяется необходимостью прогнозирования энергопотребления для решения выше указанных задач и разработкой методики.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности:

Диссертация соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы:

П.1 Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

П.4 Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Степень разработанности темы исследования

Проблемами обеспечения электроснабжения потребителей в Арктике и вопросами исследования режимов работы ветродизельных комплексов занимаются многие отечественные ученые, среди которых Елистратов В.В., Лукутин Б.В., Соснина Е.Н. и другие.

Однако в работах перечисленных авторов не рассматривается применение методов машинного обучения для анализа энергопотребления и генерации электроэнергии в ветродизельном комплексе и уделено недостаточно внимания построению на основе таких алгоритмов прогнозных моделей.

Основоположниками метода главных компонент являются следующие ученые: метод изобретен К. Пирсоном в 1901 г., с работы Т. Хасти началось изучение главных многообразий, основные руководства изложены в работах Айвазяна С. А., Бухштабера В.М., Енюкова И.С., Мешалкина Л.Д., современные обзоры представлены работами Д. Вунша, Горбань А.Н., Зиновьева А.Ю., Б. Кегль.

Метод *Singular Spectrum Analysis (SSA)* является последователем метода главных компонент. Данный метод был подробно рассмотрен в работах отечественных ученых: Галактионова Ю.К., Голяндина Н.Э., Данилова Д.Л. и Жиглявского А.А., Ефимова В.М., Шушпановой Н.Ф.

Темы прогнозирования временных рядов электропотребления, проблемы надежности балансов энергии рассмотрены в работах: Абрамовича Б.Н., Беляева Н.А., Седова А.В., Воропая Н.И., Каялова Г.М., Бэнна Д.В., Усатикова С.В., Гальяны Ф.Д., Надтоки И.И., Степанова В.П., Сухарева М.Г., Гордеева В.И., Гурского С.К., Гамма А.З., Доброжанова В.И., Дж.Гросса, Макоклюева Б.И., Коровкина Н.В., Фармера Е.Д. и других известных ученых.

Объект исследования – электротехнический комплекс, питающийся от автономных источников энергии, включающих ветроэнергетическую установку и дизель-генераторы.

Предмет исследования – энергообеспечение объекта с коммунально-бытовой нагрузкой при изменяющихся климатических условиях.

Цель работы – повышение эффективности и бесперебойности электроснабжения электротехнического комплекса с автономным питанием в различных климатических условиях.

Идея работы. Повышение эффективности и бесперебойности электроснабжения электротехнического комплекса с автономным питанием осуществляется на основе применения разработанной методики прогнозирования электропотребления с учетом дополнительно введенной зависимости его значения от климатических условий в различное время года.

Основные задачи исследований:

1. Анализ существующих методов и методик прогнозирования с целью выработки требований для разработки прогнозной модели энергопотребления.

2. Анализ процесса потребления электрической энергии на основе SSA анализа с целью выявления в нем взаимосвязей с изменениями климатических условий и выбора метода прогнозирования, обеспечивающего наиболее высокую точность прогноза.

3. Разработка методики прогнозирования генерации и энергопотребления с целью планирования необходимых объемов генерации электрической энергии. Формирование набора исходных

данных для модели прогнозирования электропотребления потребителей.

4. Разработка прогнозной модели процесса электропотребления потребителей с учетом метеофакторов на основе модели *ARMA* (модель авторегрессии – скользящего среднего).

5. Определение экономической оценки эффективности внедрения методики прогнозирования нагрузки.

Научная новизна работы:

Установлены зависимости формирования графика генерации электрической энергии ветродизельным комплексом на основе проведенного *SSA* анализа.

Сформирована методика построения модели для прогнозирования энергопотребления с использованием климатических характеристик и накопленных данных о потреблении электрической энергии за определенный период времени.

Создана прогнозная модель энергопотребления и генерации на основе модели *ARMA* (модель авторегрессии – скользящего среднего) для электротехнического комплекса с автономным питанием, учитывающая влияние изменения внешних климатических условий.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Представлены методические рекомендации по формированию методики построения модели для прогнозирования энергопотребления с использованием климатических характеристик и накопленных данных о потреблении электрической энергии за определенный период времени.

Разработана прогнозная модель энергопотребления на основе модели *ARMA* для электротехнического комплекса, учитывающая влияние изменения внешних климатических условий.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для анализа данных генерации и прогнозирования энергопотребления на других объектах, имеющих в своем составе ветродизельный комплекс.

Методология и методы исследований

В рамках диссертационной работы были применены

следующие методы: теоретические научные исследования осуществлялись с использованием методов численного анализа в пакете *Microsoft Office Excel*; при построении модели прогнозирования применялись методы регрессионного, факторного анализа, машинного обучения и программирования на языке *Python*, математического моделирования и прогнозирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Применение метода формирования величины генерации в ветродизельном комплексе, основанного на полученных зависимостях потребления электроэнергии от климатических условий с использованием метода спектрального анализа (*SSA*) и модели авторегрессии – скользящего среднего (*ARMA*), позволяет обоснованно выбрать мощность и состав генерируемых установок в ветродизельном комплексе.

2. Планирование необходимых объемов генерации электроэнергии, распределяемой между ветроустановкой и дизель-генераторной установкой, может осуществляться на основе разработанной модели прогнозирования генерации энергии ветроустановкой в зависимости от климатических факторов и электрической нагрузки, что повысит эффективность работы автономного электротехнического комплекса.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается теоретическими обоснованиями и использованием методов регрессионного, факторного анализа и программирования на языке *Python* с использованием базы данных с объекта, расположенного в Хабаровском крае.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на всероссийских и международных конференциях:

- III международной научной конференции «Арктика: история и современность», г. Санкт-Петербург, 2018 г.;
- Международной конференции «BHT – FREIBERGER UNIVERSITÄTSFORUM» в ТУ «Фрайбергская горная академия», Германия, 2018 г.;

- Конференции молодых исследователей России по электротехнике и электронике IEEE, г. Санкт-Петербург, 2019 г.;
- 62 Международной научной конференции в Горно-геологический университет им. И. Рылъски, Болгария, 2019 г.;
- International Scientific Conference on Energy, EECE-2019, г. Санкт-Петербург, 2019 г.;
- III Международном молодежном научно-практическом форуме «Нефтяная столица» 2020 г.;
- Международной научно-практической конференции «IPDME-2020», г. Санкт-Петербург, 2020 г.

Личный вклад автора

В рамках исследования автором были сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, был проведен обзор зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, проведен анализ существующих методов прогнозирования. Сформулированы и доказаны научные положения. Разработана методика прогнозирования для объекта с коммунально-бытовой нагрузкой на основе исследованных существующих методов и модель для решения задач прогнозирования энергопотребления. Проведена интерпретация полученных результатов моделирования и сделаны выводы. Подготовлены научные публикации и представлены на конференциях основные результаты диссертационной работы.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования *Scopus*. Получено 1 свидетельство о регистрации государственной программы для ЭВМ.

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 108 наименований, и 1 приложения. Диссертация изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков и 18 таблиц.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность кандидату технических наук, доценту, директору Учебно-научного центра цифровых технологий Горного университета Юрию Леонидовичу Жуковскому за помощь в подготовке и проведении научных исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ проблем в области электроснабжения регионов с автономным питанием, которое осуществляется от автономных источников электроснабжения – дизель-генераторов.

Объектом исследования является ветродизельный комплекс, расположенный в Хабаровском крае и относящийся к территории Крайнего Севера. Среднегодовая мощность электропотребления – 43 кВт, пиковая мощность в году – 97 кВт. Среднее отклонение месячного электропотребления – 14,5%. В сравнении с самым теплым месяцем июлем и самым холодным месяцем декабрем, разница в объемах потребления электроэнергии достигает до 2,5 раз. Функциональная схема электротехнического комплекса представлена на рисунке 1:

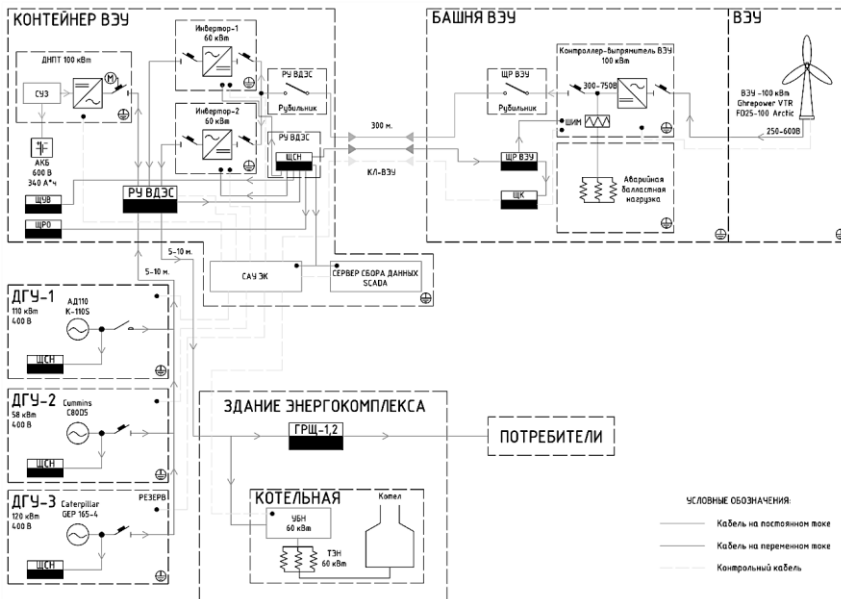


Рисунок 1 – Функциональная схема электротехнического комплекса

Проведя анализ показателей графиков электрических нагрузок, было выявлено, что преимущественно в данном электротехническом комплексе ДГУ работают с недогрузкой, что увеличивает расход топлива и снижает КПД, особенно в зимний период времени. Поэтому прогноз энергопотребления становится актуальной задачей для повышения эффективности использования дизель-генераторов и ветроустановок.

Однако не все методы прогнозирования могут использоваться для формирования прогнозных моделей в течение периода прогнозирования. В том числе результаты могут обладать различной точностью, поскольку исследование тесно взаимосвязано с изменениями в процессе электропотребления объектом, типом нагрузки потребителей и внешними климатическими изменениями. В первую очередь на изменение объемов потребления электроэнергии влияют температура воздуха окружающей среды, сезонность и продолжительность светового дня.

Во второй главе для анализа исходных данных использовался метод SSA. Суть данного метода заключается в разложении исходного ряда генерации электроэнергии на совокупность составляющих его компонент: тренды, аperiodические составляющие, а также шумовые компоненты. Данные преобразования позволяют отобразить связь выработки электроэнергии с климатическими факторами, чем отличается выбранный метод от ему подобных.

Для анализа временных рядов выбирается длина окна L . Данный параметр является входным параметром алгоритма SSA и может быть выбран в зависимости от задач исследования. Для выявления при какой длине окна восстановленный ряд будет иметь наибольшую точность с исходным рядом, было произведено сравнительное моделирование при различной длине окна $L = 7, 14, 30$ компонент.

Как было установлено из графиков генерации ВЭУ, на первую компоненту приходится 88% описания исходного ряда при $L=7$, 80% при $L=14$, 75% при $L=30$. Соответственно, можно сделать вывод, что чем больше собственное значение главной компоненты, тем больше вклад соответствующей восстановленной компоненты. При длине окна $L=7$ схожесть восстановленного ряда с исходным будет максимальной, при этом остается возможность проанализировать аperiodические составляющие ряда и шумовые компоненты. В случае с ДЭС разница вклада первых компонент при различной длине окна не значительна и остается достаточно велика в процентном соотношении (более 85% во всех случаях).

В результате сравнительного анализа графиков необходимой генерации, полученных после разложения ряда на компоненты: тренд, аperiodическую составляющую и шум, был сделан вывод, что в летний период с июня по август наблюдается относительно стабильная выработка электроэнергии. В течение данного периода на выработку электроэнергии климатические параметры практически не влияют. Однако в весенне-осенний период наблюдаются помехи в данных, амплитуда шумовых компонент увеличивается, что характеризует влияние резких климатических изменений на работу

электрооборудования, и, так как генерация определяется энергопотреблением, неравномерность энергопотребления.

Используя комбинации выбранных компонент разложения, были получены восстановленные временные ряды, которые корректно отображают динамику процесса энергопотребления. На рисунках 2 и 3 показано сравнение исходного временного ряда генерации электроэнергии ВЭУ и ДЭС соответственно и восстановленного (сглаженная линия) по сумме первых двух компонент.

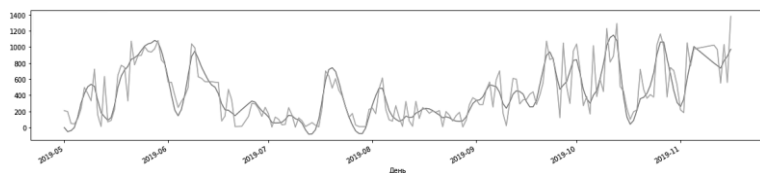


Рисунок 2 – Исходный и восстановленный временные ряды генерации электроэнергии ВЭУ

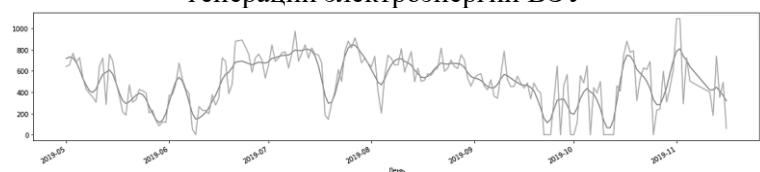


Рисунок 3 – Исходный и восстановленный временные ряды генерации электроэнергии ДЭС

Полученные компоненты разложения исходного временного ряда являются интерпретируемыми с точки зрения наблюдаемого процесса и позволяют проводить более детализированные исследования режимов работы электротехнического комплекса.

Применение машинного обучения позволит на основе базы данных, собранных в процессе эксплуатации электротехнического комплекса, анализировать влияние климатических факторов как на объекты генерации электроэнергии и их работу, так и на энергопотребление, устанавливать взаимосвязи между «возмущениями» окружающей среды и работой электрооборудования.

В результате была сформирована методика построения прогноза генерации и энергопотребления в виде алгоритма с учетом климатических характеристик и накопленных данных об энергопотреблении за исследуемый период времени (рисунок 4).

Таким образом, в работе представлен алгоритм для обоснования выбора мощности и состава ВДЭС.

В третьей главе представлена проверка исследуемого временного ряда генерации электроэнергии на стационарность по критерию Дики-Фуллера. Результат интерпретировался на основе полученных значений *ADF Statistics*. Если статистическое *ADF* значение меньше значения с уровнем значимости 5%, что удовлетворяет для решения подобных технических задач, то ряд является стационарным. Если статистическое *ADF* значение больше критических значений, то ряд скорее всего является нестационарным и зависит от времени. В результате проведенного теста сделан вывод о нестационарности временного ряда и необходимости применения преобразования Бокса-Кокса, которое является наиболее часто применяемым при неизвестном типе распределения. Преобразование характеризуется параметром λ . При значении λ равном нулю, осуществляется логарифмическое преобразование входной последовательности (1), а при значении λ , отличном от нуля – степенное (2).

$$x^* = \log(x + a) \text{ при } \lambda = 0, \quad (1)$$

$$x^* = \frac{(x+a)^\lambda - 1}{\lambda} \text{ при } 0 < \lambda \leq 1, \quad (2)$$

где x^* – ряд после преобразования; a – величина смещения для сдвига ряда в положительную область при наличии отрицательных значений.

В рамках разработки модели для прогнозирования энергопотребления принято решение использовать модель авторегрессии – скользящего среднего (*ARMA*), так как применение подобной модели удовлетворяет задачам исследования. Чтобы построить модель, необходимо знать ее порядок, состоящий из 2-х параметров: p – порядок компоненты *AR*, q – порядок компоненты *MA*. Далее были изучены авторкорреляционная функция (*ACF*) для

определения q и частично автокорреляционная функция ($PACF$) для определения p .

Функции, выведенные для ряда выработки электроэнергии ДЭС, выглядят следующим образом (рисунок 5):

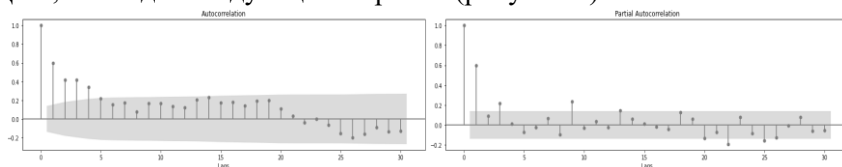


Рисунок 5 – Автокорреляционная и частично автокорреляционная функции

После изучения кореллограмм можно сделать вывод, что $p=1$ и $q=4$.

Однако при настройке модели были использованы коэффициенты $p=4$ и $q=4$ для минимизации ошибок в модели $ARMA$, при этом качество и интерпретируемость модели не снижаются.

Функции, выведенные для ряда выработки электроэнергии ВЭУ, показаны на рисунке 6:

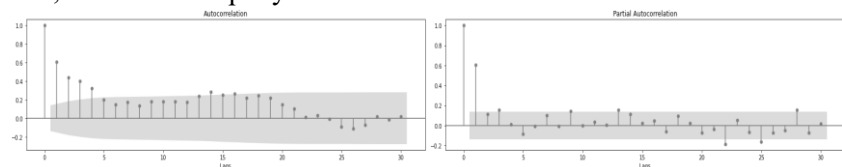


Рисунок 6 – Автокорреляционная и частично автокорреляционная функции

Аналогично предыдущему ряду, согласно кореллограммам, $p=1$ и $q=3$. Также, как и для ряда генерации электроэнергии ДЭС, при настройке модели были использованы коэффициенты $p=3$ и $q=4$ для минимизации ошибки в модели $ARMA$, при этом качество и интерпретируемость модели не снижаются.

Графики полученных моделей $ARMA$ для ряда выработки электроэнергии ВЭУ и ДЭС представлены на рисунках 7 и 8:



Рисунок 7 – Модель временного ряда ДЭС

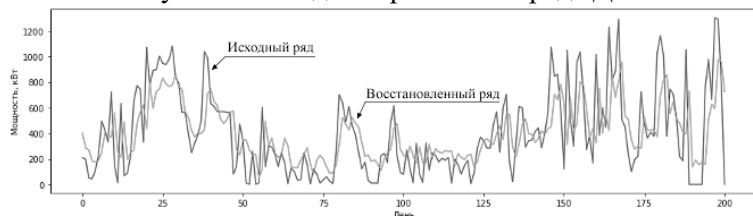


Рисунок 8 – Модель временного ряда ВЭУ

Ошибки прогнозирования для ряда выработки электроэнергии ДЭС (при $p=4$ и $q=4$) и ВЭУ (при $p=3$ и $q=4$) представлены в таблице 1:

Таблица 1 – Ошибки и коэффициент детерминации

Метрика качества модели	Спрогнозированный ряд выработки электроэнергии ВЭУ	Спрогнозированный ряд выработки электроэнергии ДЭС
Средняя абсолютная ошибка <i>MAE</i>	191,041	156,706
Средняя квадратичная ошибка <i>RMSE</i>	257,493	209,907
Коэффициент детерминации R^2	0,533	0,591

Таким образом, значения ошибок снизились, когда были подобраны коэффициенты для модели.

В четвертой главе был разработан алгоритм работы (рисунок 9), который реализует система автоматического управления, для выбора режима работы в зависимости от прогноза

выработки электроэнергии ветроэнергетической установкой за счет учета климатических факторов (ветра) и прогноза энергопотребления, что было показано в третьей главе. Если известна выработка электроэнергии ВЭУ, можно определить, какого объема мощности не хватает для покрытия спроса.

Для повышения эффективности использования ДГУ предлагается рассмотреть возможность изменения состава генерации, то есть замену двух ДГУ 58 кВт и 110 кВт на одну установку мощностью 80 кВт.

Эффективность использования ДЭС связана в первую очередь с эксплуатационными затратами в процессе работы дизель-генераторов. Стоит также выделить несколько показателей (таблицы 2, 3):

Таблица 2 – Снижение расхода топлива ДГУ

Источник генерации	Генерация электроэнергии, кВт·ч/год	Расход топлива, л/год	Затраты на топливо, руб./год
Только ДГУ (58 и 120 кВт)	377 046	123 800	6 062 900
ДГУ 58 и 110 кВт в составе ВДЭС	244 167	80 170	4 027 740
ДГУ 80 кВт	180 404	20 936	1 051 825

Таблица 3 – Снижение вредных выбросов при сжигании топлива

Объекты генерации	Выбросы, т/год					
	СО	NO _x	СН	С	SO ₂	СН ₂ О
Только ДГУ (58 и 120 кВт)	3743,7	4263,7	1955,0	390,0	478,4	72,8
ДГУ 58 и 110 кВт в составе ВДЭС	2087,6	2559,0	1010,1	168,4	343,4	40,4
ДГУ 80 кВт	545,2	668,3	263,8	44,0	89,7	10,6

Годовые эксплуатационные расходы определяются следующими видами затрат (таблица 4):

Таблица 4 – Эксплуатационные затраты

Затраты	Сумма, руб./год
Топливо	4 027 740
Амортизационные отчисления	788 088
Заработная плата	648 000
Социальные отчисления (30% от з/п)	194 400
Затраты на ремонт	56 900
Итого:	5 715 128

Таким образом, в четвертой главе проведен сравнительный анализ показателей эффективности относительно исходного состава генерации и с учетом замены двух ДГУ на одну установку. Выявлено, что выбросы загрязняющих веществ сократятся в 3,8 раз, расход топлива снизится до 20 936 л/год, затраты на топливо составят 1 051 825 руб. в год, а эксплуатационные затраты на ДГУ составят 5 715 128 руб. год.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для анализа данных генерации и прогнозирования энергопотребления на других объектах, имеющих в своем составе ветродизельный комплекс. Если методика и модель прогнозирования будут применены для объекта, расположенного в других климатических условиях, необходимо рассмотреть и учесть индивидуальный набор климатических факторов.

Разработанная методика позволяет исследовать различные базы данных, включающие в себя не только данные генерации или электропотребления, но и дополнительные факторы – климатические, эксплуатационные и другие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – повышение эффективности и бесперебойности электроснабжения электротехнического комплекса с автономным питанием в различных климатических условиях и с учетом неравномерности энергопотребления в зависимости от времени года.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Выявлено, что не все методы прогнозирования позволяют отразить влияние таких параметров, как сезонные условия и климатические изменения при формировании планируемого графика нагрузок и графика выработки электроэнергии ветроустановками в ветродизельном комплексе. Интерпретация данных с точки зрения описания протекающих процессов с высокой точностью иногда не представляется возможной. Поэтому в электроэнергетике все чаще применяются методы машинного обучения и построение на основе таких алгоритмов прогнозных моделей. В связи с этим выработаны требования для разработки прогнозной модели энергопотребления.

2. Проведен анализ процесса потребления электрической энергии потребителей на основе спектрального анализа (SSA) и выявлены закономерности. Так, в летний период наблюдается относительно стабильная выработка электроэнергии. Однако в весенне-осенний период наблюдаются помехи в данных, амплитуда шумовых компонент становится больше, что характеризует влияние резких климатических изменений на работу электрооборудования, а соответственно и неравномерность энергопотребления. Зарегистрирована программа анализа данных для ЭВМ (№2021615532 от 22.04.2021 г.).

3. Разработана методика прогнозирования генерации и энергопотребления для объекта с коммунально-бытовой нагрузкой в виде алгоритма с использованием климатических характеристик и накопленных данных о потреблении электрической энергии за определенный период времени с целью планирования необходимых объемов электрической энергии. Сформирован набор исходных данных для модели прогнозирования электропотребления.

4. Разработана прогнозная модель процесса электропотребления с учетом метеофакторов на основе модели ARMA для электротехнического комплекса с автономным питанием, учитывающая влияние изменения внешних климатических условий.

5. Проведена интерпретация полученных результатов моделирования и сделаны выводы. Рассчитав ошибки до и после настройки модели, отмечено, что *MAE* для спрогнозированного ряда выработки электроэнергии ВЭУ составляет 191,041 кВт·ч, а для спрогнозированного ряда выработки электроэнергии ДЭС – 156,706 кВт·ч; *RMSE* составляет 257,493 кВт·ч и 209,907 кВт·ч соответственно.

6. Проведена экономическая оценка эффективности внедрения методики прогнозирования в электротехнический комплекс. Внедрение прогноза энергопотребления позволило снизить установленную мощность ДЭС, расход топлива до 20 936 л/год и затраты на топливо до 1 051 825 руб. в год, эксплуатационные затраты на ДГУ составят 5 715 128 руб. в год.

7. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для анализа данных генерации и прогнозирования энергопотребления на других объектах, имеющих в своем составе ветродизельный комплекс.

8. Определены направления дальнейших исследований в области прогнозирования энергопотребления за счет повышения точности прогнозирования и учета дополнительных внешних и климатических факторов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Васильков, О.С. Выравнивание графика нагрузки предприятий за счет применения гибридных накопителей электроэнергии / О.С. Васильков, Д.Е. Батуева, К.А. Хомяков, П.С. Паляницин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2020. – №1(43). – С. 27-34.

2. Батуева, Д.Е. Анализ данных генерации электроэнергии в ветродизельном комплексе с использованием алгоритма SSA / Д.Е. Батуева, Я.Э. Шклярский, И.Е. Ревин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2021. – №6. – С. 69-77.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

3. Batueva, D.E. Increasing efficiency of using wind diesel complexes through intellectual forecasting power consumption / D.E. Batueva, J.E. Shklyarskiy // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – 2019. – PP. 434-436.

4. Shklyarskiy, J.E. / The influence of external climatic factors on the accuracy of the forecast of energy consumption / J.E. Shklyarskiy, D.E. Batueva // E3S Web of Conferences. – 2019. – Volume 140. – 04014.

5. Shklyarskiy, J.E. Analysis of schedules and load indicators for the choice of the generation composition in the wind-diesel complex / J.E. Shklyarskiy, D.E. Batueva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Volume 1753(1). – 012010.

Свидетельство:

6. Свидетельство о регистрации государственной программы для ЭВМ №2021616532. Программа для анализа данных генерации электроэнергии в ветродизельном комплексе с использованием алгоритма SSA на основе языка Python : заявл. 16.04.2021 : опубл. 22.04.2021 / Батуева Д.Е., Шклярский Я.Э.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 6 с. : ил.

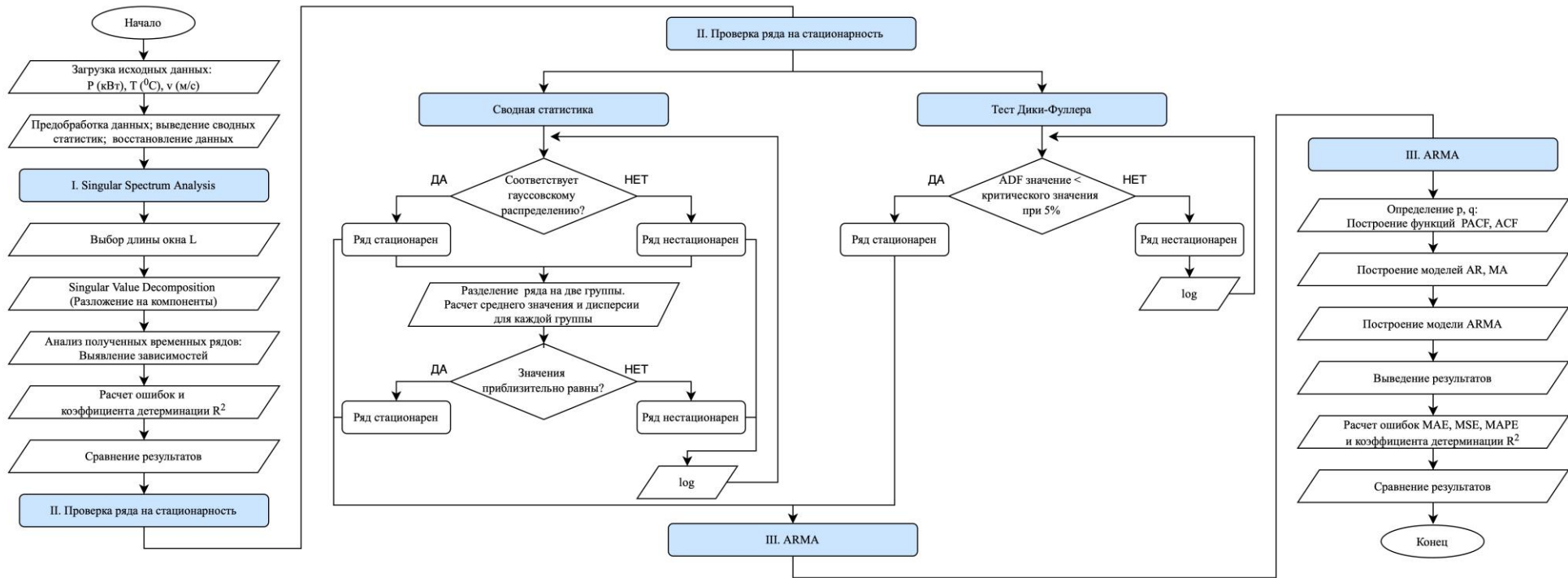


Рисунок 4 – Алгоритм методики построения прогноза

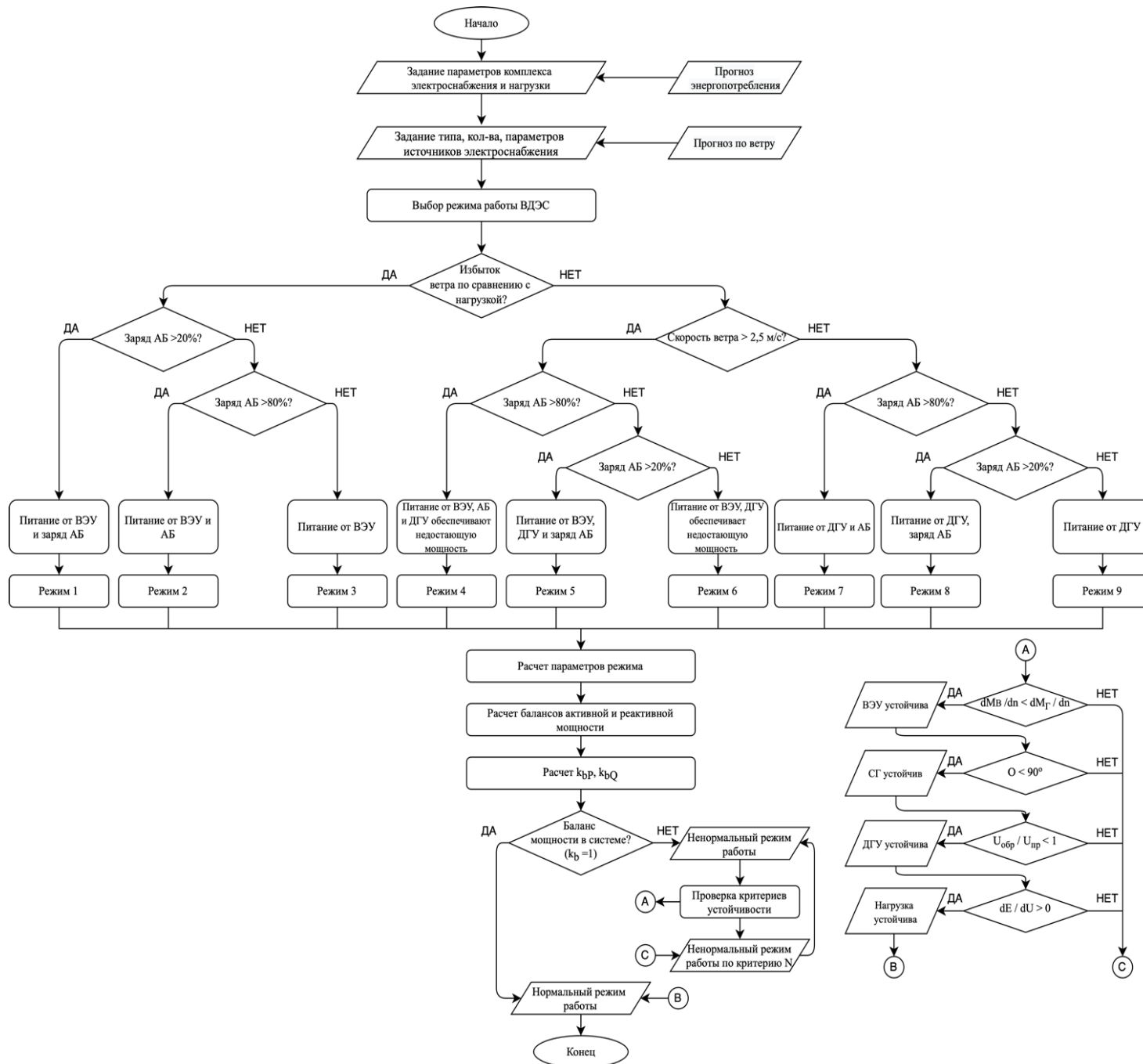


Рисунок 9 – Алгоритм выбора и оценки режима работы электротехнического комплекса