

На правах рукописи

Сенчило Никита Дмитриевич



**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ
КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ
СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

***Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы
и системы***

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

Санкт-Петербург – 2022

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Устинов Денис Анатольевич

Официальные оппоненты:

Сушков Валерий Валентинович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижевартовский государственный университет», кафедра энергетики, профессор;

Зацепин Евгений Петрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра электрооборудования, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 30 июня 2022 г. 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 апреля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



КОПТЕВА

Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В связи с постоянным ростом добычи, потребления и экспорта природного газа в России одной из основных задач является разработка мер по повышению энергетической эффективности и рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов предприятий по производству и распределению газа. На сегодняшний день затраты на электроснабжение составляет существенную часть расходов для предприятий по производству и распределению природного газа, повышая стоимость газа для населения и промышленности. Для предприятий по производству и распределению газа доля затрат на электроэнергию превышает 20%. Компрессорные станции (КС) магистрального газопровода (МГ) характеризуются высокой энергоёмкостью, а также стабильным ростом электропотребления, связанным с ростом потребления и экспорта природного газа в России.

Переменные затраты на электроснабжение от внешнего электросетевого комплекса для КС складываются из суммарного электропотребления, стоимость которого меняется в зависимости от часа суток и дня недели, платы за максимальное электропотребление в часы максимума нагрузки энергосистемы и платы за отклонения фактического электропотребления от прогнозного графика. Снижение затрат на электроснабжение может осуществляться путём снижения пиков электропотребления в часы совмещенного максимума, снижения электропотребления в часы наибольшей стоимости электроэнергии, а также снижения отклонений фактического электропотребления от прогнозного.

Решением, предложенным в диссертационном исследовании, является внедрение системы накопления электроэнергии (СНЭЭ) в электротехнический комплекс КС с целью регулирования электропотребления КС. Использование СНЭЭ позволяет оптимизировать график электропотребления, компенсируя отклонения фактических значений электропотребления от прогнозного графика, снижать затраты на электроснабжение при участии в программе управления спросом, а также снижать пиковое электропотребление. Дополнительным фактором, стиму-

лирующим развитие СНЭЭ, является то, что для обеспечения необходимой надежности электроснабжения особо ответственных потребителей КС необходима установка источников бесперебойного питания.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы по пунктам: 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.2 «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, ... критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем».

Степень проработанности темы исследования

Вопросы прогнозирования электропотребления предприятий рассмотрены в работах: Абрамовича Б.Н., Кокшарова В.А., Кумаринова А.М., D.S. Kirschen и др.

Значительный вклад в разработку методов регулирования графиков нагрузки внесли: Абрамович Б.Н., Дзюба А.П. Темы регулирования электропотребления компрессорных станций рассмотрены в работах Крюкова О.В., Аксютин О.Е., Перовощикова С.И., Пужайло А.Ф.

Вопросами разработки и исследования систем накопления электроэнергии для регулирования графиков электропотребления занимались Гусев Ю.П., Харитонов С.А., Дзюба А.П., Cho S.-M., Chowdhury N. и др. В работах указанных авторов рассматриваются вопросы применения СНЭЭ в целях регулирования графика электропотребления путём снижения пикового электропотребления. Ввиду того, что для графика электропотребления предприятия характерно несколько пиков электропотребления в течение суток, для повышения эффективности СНЭЭ используется прогноз электропотребления на сутки вперед. Однако на протяжении месяца для КС характерно изменение среднего электропотребления в несколько раз, что может сделать установленную энергоёмкость СНЭЭ избыточной либо недостаточной. Также в данных работах не рассмотрено использование СНЭЭ для снижения отклонений фактического

электропотребления от прогнозного. Для потребителей 5-6 ценовой категории планирование электропотребления осуществляется на месяц вперед, и отклонение от прогнозного графика может также привести к повышению затрат на электроснабжение. В свою очередь, компенсация отклонений от прогнозного графика при точном прогнозировании требует значительно меньшей энергоёмкости СНЭЭ, чем для выравнивания графика нагрузки, что за счет снижения капитальных затрат на установку СНЭЭ может привести к положительному экономическому эффекту.

Цель работы – повышение эффективности электроснабжения электротехнических комплексов компрессорных станций путем снижения отклонений фактических значений электропотребления от прогнозных, а также увеличения надежности особо ответственных потребителей КС за счет применения СНЭЭ.

Поставленная в диссертационном исследовании цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Обоснование необходимости применения среднесрочного прогнозирования для определения наиболее эффективной энергоёмкости СНЭЭ по критерию снижения отклонений фактических значений электропотребления от прогнозных;
2. Анализ электротехнического комплекса КС в части надежности электроснабжения и расчет вероятности безотказной работы групп особо ответственных потребителей при установке СНЭЭ;
3. Анализ графика электропотребления и разработка алгоритма среднесрочного прогнозирования электропотребления КС;
4. Создание алгоритма для определения наиболее эффективной энергоёмкости СНЭЭ по критерию снижения отклонений фактического электропотребления от прогнозного на основе среднесрочного прогноза.
5. Технико-экономическое обоснование эффективности использования СНЭЭ на КС для регулирования графика электропотребления.

Идея работы заключается в выборе наиболее эффективной энергоёмкости СНЭЭ по критерию снижения отклонения планового потребления электроэнергии от фактического на основе среднесрочного прогноза электропотребления.

Объект исследования – электротехнический комплекс компрессорной станции магистрального газопровода с установленной СНЭЭ на основе аккумуляторных батарей на уровне напряжения 0,4 кВ.

Предмет исследования – методы прогнозирования электропотребления компрессорной станции.

Научная новизна работы

1. Разработан способ среднесрочного прогнозирования электропотребления КС с высоким коэффициентом неравномерности с использованием моделей регрессионно-классификационных деревьев с учетом планового объема компримирования газа на КС в качестве экзогенного параметра, позволяющий снизить ошибку прогнозирования до 10% на горизонте прогноза в 3 месяца.

2. Разработан новый алгоритм определения наиболее эффективной величины энергоёмкости СНЭЭ по критерию снижения пикового электропотребления и отклонения планового потребления электроэнергии от фактического на основе среднесрочного прогноза электропотребления.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработанная программа на ЭВМ на языке программирования Python версии 3.9 позволяет выполнить прогнозирование электропотребления и определить наиболее эффективную величину энергоёмкости СНЭЭ по критерию снижения пикового электропотребления и отклонений прогнозного электропотребления от фактического на основе среднесрочного прогноза электропотребления.

2. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке, планировании, организации и проведении комплексных мероприятий по повышению уровня энергосбережения, энергоэффективности и надежности систем электроснабжения в электротехнических комплексах предприятий минерально-сырьевого комплекса.

3. Результаты работы внедрены в учебный процесс Горного университета при реализации специальных программ по специальности 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника, что подтверждается актом внедрения. Решение о внедрении результатов диссертационного ис-

следования принято на заседании кафедры ЭиЭМ (выписка из протокола № 09/02 от 10.02.2022). Плановая дата внедрения – осенний семестр 2022/2023 учебного года.

Методология и методы исследований

Методы теории вероятности, методы прогнозирования графиков электрических нагрузок электротехнических комплексов, методы оценки надежности систем электроснабжения, методы математического моделирования электротехнических комплексов КС в ПК АРБИТР и в среде разработки PyChart с использованием языка программирования Python.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Применение модели регрессионно-классификационных деревьев с учетом планового объема компримирования газа в качестве экзогенного параметра для среднесрочного прогнозирования электропотребления КС при неравномерном графике электропотребления позволяет снизить отклонения фактических значений электропотребления от прогнозных до 10% на горизонте прогноза в 3 месяца.

2. Применение алгоритма определения величины энергоёмкости систем накопления электроэнергии на основе среднесрочного прогноза электропотребления позволяет повысить энергетическую эффективность применения СНЭЭ по критерию снижения оплаты за электроэнергию до 1,65% при регулировании электропотребления КС.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Основные положения обсуждались на заседаниях кафедры электроэнергетики и электромеханики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», докладывались и получили положительную оценку на конференциях и семинарах:

- XIX международная научно-практическая конференция молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и транспорте», г. Санкт-Петербург, 2019 г.;

- Международная конференция «69TH Bergund Huttenmannischer Tag 2018» на базе Фрайбергской горной академии, г. Фрайберг, Германия, 7 июня 2019 г.;
- 2021 IEEE Conference of russian young researchers in electrical and electronic engineering (2021 ElConRus), г. Санкт-Петербург, 2021 г.

Личный вклад автора

Непосредственное участие в сборе и анализе исходных данных электропотребления КС МГ. Сформулированы цели, задачи исследований, основные научные положения, определены направления дальнейшего развития научных исследований по указанной тематике, а также в подготовке текстов научных публикаций и апробации основных положений работы. Произведен расчет надежности системы электроснабжения КС МГ графическим способом логико-вероятностного метода при построении и оценке параметров схем функциональной целостности в ПК АРБИТР. Созданы модели среднесрочного прогнозирования электропотребления КС с учетом неравномерности графика электропотребления. Создан новый алгоритм определения наиболее эффективной энергоёмкости СНЭЭ по критерию снижения отклонения фактического графика электропотребления от прогнозного на основе среднесрочного прогноза электропотребления.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 1 статье – в издании 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 6 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus и Web of Science). Получен 1 патент и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав, с выводами по каждой их них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 133 наименования, 1 приложение. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков и 16 таблиц.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность доктору технических наук, профессору Абрамовичу Борису Николаевичу за помощь в подготовке диссертации, сборе и анализе данных, а также за наставничество, поддержку и неоценимый вклад в научную деятельность.

ОСНОВНОЕ 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 рассмотрены режимы работы и состав оборудования КС на основе чего сделан вывод о том, что газоперекачивающие агрегаты (ГПА) с электроприводом (ЭГПА) имеют преимущества перед остальными типами приводов и составляют 16% от общего числа установленных ГПА в РФ, что обуславливает актуальность повышения энергоэффективности электроснабжения КС.

Рассмотрены возможные механизмы использования СНЭЭ, а также стоимость установки и эксплуатации СНЭЭ на крупных промышленных предприятиях с целью повышения надежности электроснабжения, на основе чего сделан вывод о том, что высокая стоимость установки и эксплуатации СНЭЭ обуславливает необходимость участия в рыночных механизмах, что позволит повысить эффективность использования СНЭЭ и получить положительный экономический эффект.

Во второй главе выполнен обзор методов регулирования стоимости электроснабжения для КС, на основе чего сделан вывод о необходимости прогнозирования электропотребления для снижения платы за электроэнергию и мощность. Также выполнен анализ существующих и

наиболее часто применяемых методы прогнозирования электропотребления, их преимуществ и недостатков, в результате которого выявлено, что для среднесрочного прогнозирования электропотребления на сегодняшний день в общем случае наиболее эффективны авторегрессионные модели и модели на основе регрессионно-классификационных деревьев.

В главе произведен анализ методов определения факторов, влияющих на прогноз электропотребления. Сделан вывод, что для вычисления линейной корреляции между электропотреблением КС и факторами, влияющими на электропотребление, наиболее применим критерий Пирсона, а для нелинейной – критерий Джини. Определена линейная и нелинейная корреляция между электропотреблением КС и экзогенными (плановый объем компримирования газа) и эндогенными (день, месяц и день недели) параметрами. Результаты исследования корреляции представлены в таблице 1.

Таблица 1 – корреляция между целевым признаком (электропотреблением) и факторами, влияющими на целевой признак.

Признак	Объем производства	День	Месяц	День недели
Линейная корреляция	0,77	0,15	0,11	0,05
Нелинейная корреляция	0,77	0,55	0,30	0,17

В третьей главе рассмотрены методы повышения надежности потребителей первой категории особой группы КС МГ на уровне напряжения 0,4 кВ. Часть электротехнического комплекса КС относится к электроприемникам особой группы первой категории, электроснабжение которых от внешней сети должно осуществляться от двух независимых взаимно резервируемых источников, а также должно предусматриваться дополнительное питание от третьего независимого взаимно резервирующего источника питания.

Проведен анализ однолинейной схемы электроснабжения КС МГ. Для оценки надежности представленной структуры применен логико-вероятностный метод. Для оценки сложных систем параметры и связи элементов структур представляются в виде схемы функциональной целостности с использованием ПК АРБИТР (рисунок 1).

Получены значения положительных вкладов каждого элемента в общую надежность системы до (рисунок 2, а) и после установки СНЭЭ (рисунок 2, б).

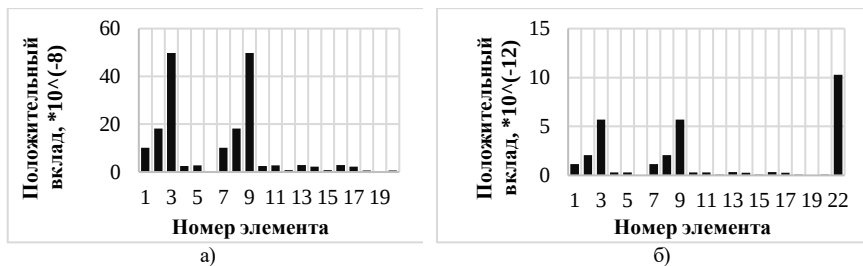


Рисунок 2 – результаты анализа надежности

Исходя из результатов, указанных на рисунке 2,б сделан вывод о том, что СНЭЭ имеет наибольший положительный вклад, а также значение положительных вкладов других элементов системы снижается при внедрении СНЭЭ, из чего следует, что надежность других элементов после внедрения СНЭЭ меньше влияет на надежность электроснабжения потребителей 0,4 кВ, следовательно, снижается необходимость затрат на увеличение их надежности.

В результате расчетов выявлено увеличение вероятности безотказной работы потребителей, электроснабжение которых осуществляется на напряжении 0,4 кВ, при установке СНЭЭ. Результаты сравнения вероятности безотказной работы представлены на рисунке 3.

Из анализа графика на рисунке 3 сделан вывод, что при установке СНЭЭ на уровне напряжения 0,4 кВ в качестве источника бесперебойного питания для особо ответственных потребителей КС вероятность безотказной работы в течение срока эксплуатации СНЭЭ выше допустимого уровня вероятности безотказной работы (0,995). При электроснабжении в условиях существующей схемы электроснабжения без внедрения СНЭЭ в течение 3 лет с даты исследования требуется проведение планово-профилактических испытаний оборудования электротехнического комплекса КС для поддержания надежности электроснабжения в требуемых пределах.

Выполнен анализ временного ряда электропотребления КС (рисунок 4).

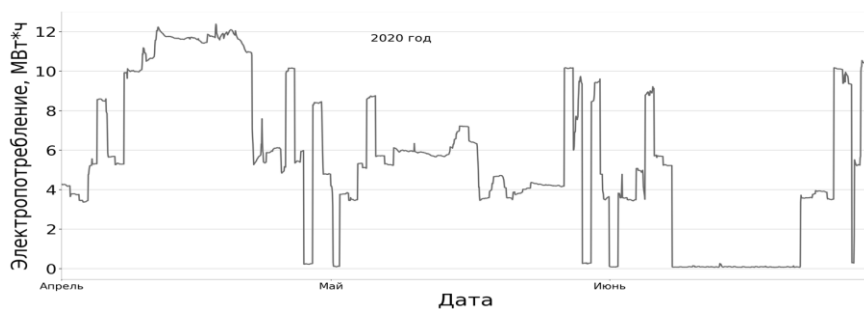


Рисунок 4 – график электропотребления КС.

На рисунке 5 представлена плотность распределения значений электропотребления КС.

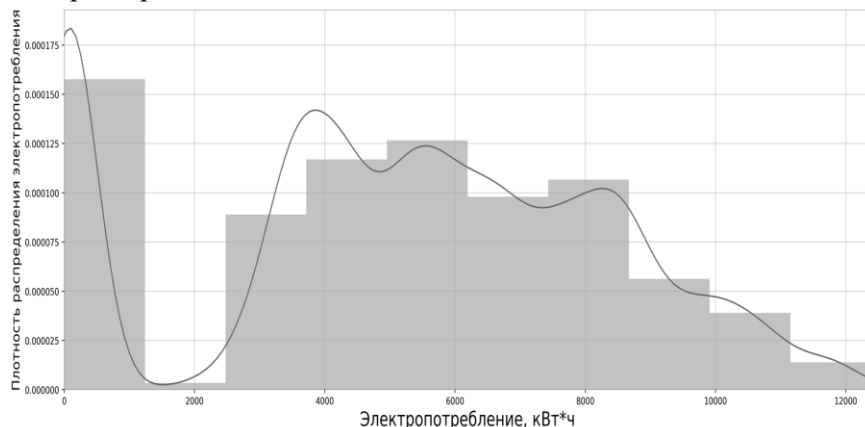


Рисунок 5 - Распределение значений почасового электропотребления

На основе анализа графика на рисунке 5 сформулирована гипотеза о нормальности распределения. Для подтверждения данной гипотезы использован критерий Колмогорова-Смирнова, в котором в качестве нулевой гипотезы принято, что значения временного ряда распределены нормально. По результатам вычислений статистика теста составляет 0,93, при $p < 0,05$, поэтому гипотеза может быть отвергнута.

Определено значение коэффициента вариации для графика электропотребления КС, равное 0,63. Коэффициент вариации больше 0,33 свидетельствует о неравномерности графика.

По результатам сравнения преимуществ и недостатков моделей для прогнозирования электропотребления КС сделан вывод о том, что прогноз электропотребления с использованием регрессии с применением градиентного спуска с включением в модель экзогенных параметров позволяет снизить ошибку прогнозирования на горизонте прогноза в 3 месяца до 10%. Сравнение прогнозных моделей представлено в таблице 2.

Таблица 2 – сравнение моделей прогноза электропотребления.

Модель	Средняя абсолютная ошибка, кВт·ч	Средняя абсолютная ошибка в процентах
Авторегрессионная модель	2104	40%
Регрессионные деревья с применением градиентного спуска	521	10%

Сравнение фактических значений электропотребления с прогнозными значениями с 95% доверительным интервалом представлено на рисунке 6.

В четвертой главе разработан алгоритм выбора наиболее эффективной энергоёмкости СНЭЭ по критерию снижения отклонения прогнозного электропотребления от планового на основе прогноза электропотребления, а также снижения пикового электропотребления.

Задача определения наиболее эффективной энергоёмкости СНЭЭ сводится к определению значения энергоёмкости, при котором в расчетный период отклонение фактического электропотребления от прогнозного при учете разряда СНЭЭ с целью снижения данных отклонений будет минимальным, а также пиковое электропотребление будет снижено на максимальную величину в течение суток с учетом нескольких пиков электропотребления в часы совмещенного максимума нагрузки (1):

$$\max\{[f_1(|y_i - \hat{y}_i|), f_2(|y_i - \hat{y}_i|), f_3(|y_i - \hat{y}_i|), \dots, f_n(|y_i - \hat{y}_i|)]\} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где i – час совмещенного максимума нагрузки, определенный системным оператором единой электроэнергетической системы;

y_i – фактическое значение электропотребления предприятия, кВт*ч;
 $\hat{y}_i$ – прогнозируемое значение электропотребления предприятия, кВт*ч;
 n – размер рассматриваемой выборки.

Алгоритм выбора наиболее эффективной энергоёмкости представлен на рисунке 7.

При установке СНЭЭ на уровне СН КС МГ на основе прогноза суточных пиков электропотребления задается алгоритм функционирования СНЭЭ для снижения отклонения фактического электропотребления от планового. С помощью алгоритма найдено наиболее эффективное значение энергоёмкости СНЭЭ при известных значениях ошибки прогноза.

Очевидно, что максимальное снижение отклонений будет достигнуто при максимальной энергоёмкости батареи, но стоимость установки СНЭЭ большой энергоёмкости может превышать возможный экономический эффект. Поэтому для определения эффективности СНЭЭ для электротехнического комплекса КС МГ введен коэффициент (2):

$$\eta_{\text{СНЭЭ}} = \frac{\Delta P}{E_c}, \quad (2)$$

где η – эффективность СНЭЭ; ΔP – среднее снижение максимального электропотребления, кВт*ч; E_c – энергоёмкость батареи, кВт*ч.

Результаты расчета эффективности использования энергоёмкости СНЭЭ представлены на рисунке 8:

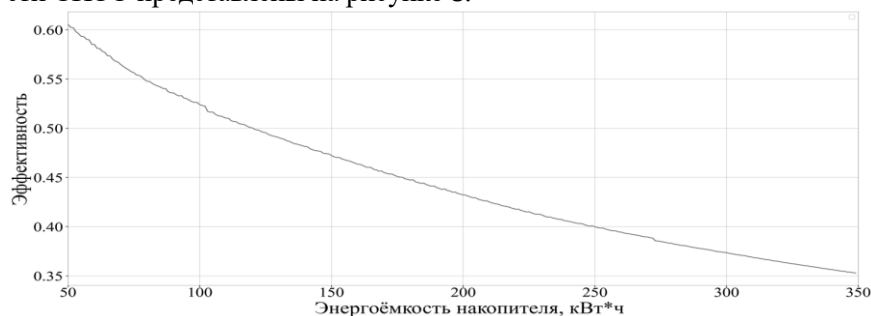


Рисунок 8 - Эффект от использования СНЭЭ

Экономический эффект от снижения отклонений фактического электропотребления от планового для потребителей 6-ой ценовой категории заключается в снижении максимального пикового электропотребления в часы совмещенного максимума нагрузки, а также снижения оплаты за электроэнергию на балансирующем рынке. Результат сравнения капитальных и операционных затрат СНЭЭ, и суммарного экономического эффекта от использования СНЭЭ для снижения отклонений фактического электропотребления от планового представлен на рисунке 9.

Экономически целесообразным является использование СНЭЭ в случаях, когда экономический эффект от использования СНЭЭ превышает затраты. Величины энергоёмкостей, при которых выполняется данное условие, представлены на рисунке 10.

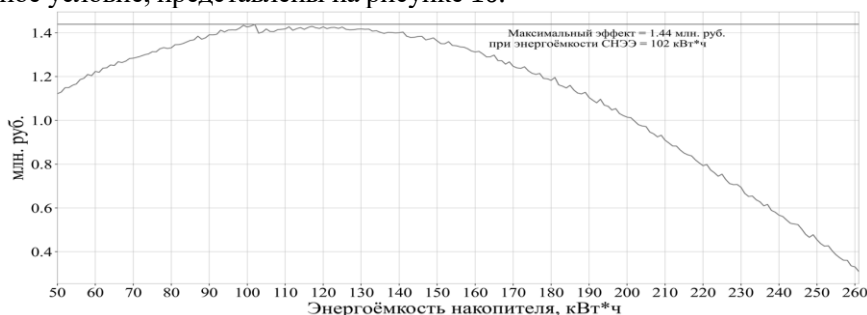


Рисунок 10 - разница между экономическим эффектом и затратами на СНЭЭ для ряда энергоёмкостей.

В диссертационном исследовании выполнен расчет положительного экономического эффекта от использования систем накопления энергии с участием в системе реагирования спроса и уменьшения отклонений графика нагрузки от планового.

Результаты расчета экономического эффекта представлены в таблице 3:

Таблица 3 - Расчетный экономический эффект от использования СНЭЭ энергоёмкостью 102 кВт*ч за 2020г.

Область применения СНЭЭ	Снижение пикового электропотребления, отклонений от прогноза, тыс. руб.	Участие в системе управления спросом, тыс. руб.	Затраты на эл.-снабжение, тыс. руб.	Относительное снижение платы за электроэнергию, %
Экономический эффект	534	2 228	167 454	1,65

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности электроснабжения электротехнических комплексов компрессорных станций путем определения наиболее эффективной энергоёмкости СНЭЭ в электротехнических комплексах КС МГ по критерию снижения отклонений фактических значений электропотребления от прогнозного на основе среднесрочного прогнозирования электропотребления с использованием планового объема компримирования газа на КС в качестве экзогенного параметра, а также увеличения надежности особо ответственных потребителей за счет применения СНЭЭ.

Полученные результаты позволили спрогнозировать эффективность использования энергоёмкости СНЭЭ для компенсации отклонений от планового энергопотребления. Предложенный алгоритм прогнозирования в этом исследовании был применим к предприятиям с разными типами производства, поскольку модель прогноза подходит для неравномерного графика электропотребления.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что установка и применение СНЭЭ в качестве резервного источника электроснабжения для особо ответственных потребителей 0,4 кВ КС МГ позволяет увеличить вероятность безотказной работы и снизить количество планово-профилактических испытаний оборудования электротехнического комплекса КС для поддержания требуемого уровня надежности электроснабжения.

2. В результате анализа графиков электропотребления электротехнического комплекса КС МГ установлено, что коэффициент вариации графика электропотребления КС равен 0,63, из чего можно сделать вывод о том, что график является неравномерным. В результате анализа распределения значений электропотребления при проверке по критерию Колмогорова-Смирнова отвергнута гипотеза о нормальном распределении значений.

3. Выполнено исследование корреляции электропотребления эндогенными (день, месяц и день недели) и экзогенными (плановый объем компримирования газа на КС) параметрами по критерию Пирсона и Джини, в результате которого сделан вывод о том, что плановый объем компримирования газа имеет наибольшую корреляцию с электропотреблением (0,77), а при использовании критерия Джини при построении моделей регрессионно-классификационных деревьев увеличивается корреляция между электропотреблением и эндогенными параметрами.

4. В результате анализа методов прогнозирования для неравномерных графиков электропотребления КС выявлено, что среднесрочное прогнозирование с использованием модели регрессионно-классификационных деревьев с учетом планового объема компримирования газа в качестве экзогенного параметра позволяет снизить ошибку прогноза при среднесрочном прогнозировании графика электропотребления КС МГ до 10% на горизонте прогноза в 3 месяца.

5. Введен коэффициент $\eta_{\text{СНЭЭ}}$, позволяющий оценить эффективность использования энергоёмкости СНЭЭ. Разработан и запатентован алгоритм определения наиболее эффективной энергоёмкости СНЭЭ по критерию наибольшего снижения отклонения фактического графика электропотребления от планового для КС МГ на основе прогноза электропотребления (№2021680830).

6. Проведена экономическая оценка эффективности внедрения СНЭЭ в электротехнических комплексах КС МГ, на основе которой выявлено, что внедрение СНЭЭ при использовании предложенного алгоритма выбора энергоёмкости СНЭЭ позволяет снизить плату за электроэнергию на 1,65% при использовании СНЭЭ в условиях электротехнического комплекса КС МГ.

Направлением дальнейших исследований является повышение точности прогнозирования электропотребления за счет сбора дополнительной информации о внешних факторах, влияющих на электропотребление, а также усовершенствование алгоритма выбора наиболее эффективной энергоёмкости СНЭЭ за счёт оценки дополнительных факторов, влияющих на режим электропотребления КС.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикация в издании из Перечня ВАК:

1. **Сенчило, Н.Д.** Использование распределенной генерации на предприятиях угледобычи при неравномерном графике нагрузки системы / Н.Д. Сенчило, Б.И. Гарипов, Д.А. Лях // Промышленная энергетика. – 2019. – № 10 – С. 54–59.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus, Wos):

2. Богданов, И.А. Автоматическая система компенсации провалов напряжения в электроэнергетических системах судов с электродвижением / И.А. Богданов, **Н.Д. Сенчило** // Морские Интеллектуальные Технологии. – 2020. – № 3–1 (49) – С. 212–218. DOI:10.37220/MIT.2020.49.3.028 (WoS).

3. Malarev, V. Algorithm for automatic compensation of voltage dips in power supply of industrial facilities / V. Malarev, I. Bogdanov, **N. Senchilo** // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – Т. 18 – № 2 – С. 173–180. DOI:10.5937/jaes18-26361 (Scopus).

4. **Senchilo, N.** Improving the Energy Efficiency of Electricity Distribution in the Mining Industry Using Distributed Generation by Forecasting Energy Consumption Using Machine Learning / N. Senchilo, I. Babanova // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon): 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2020. – С. 1–7. DOI:10.1109/FarEastCon50210.2020.9271335 (Scopus).

5. **Senchilo, N.D.** Analysis of the Influence of Various Types of Generation on the Formation of a Daily Schedule of Electrical Loads of

the Power System, Taking Into Account Abnormal and Irregular Time Intervals / N.D. Senchilo // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus): 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – 2021. – С. 1544–1548. DOI:10.1109/ElConRus51938.2021.9396394 (Scopus).

6. **Senchilo, N.D.** Method for Determining the Optimal Capacity of Energy Storage Systems with a Long-Term Forecast of Power Consumption / N.D. Senchilo, D.A. Ustinov // Energies. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. – Vol. 14 – № 21 – P. 7098. DOI:10.3390/en14217098 (Scopus).

7. Zhukovskiy, Y.L. Development of an Algorithm for Regulating the Load Schedule of Educational Institutions Based on the Forecast of Electric Consumption within the Framework of Application of the Demand Response / Y.L. Zhukovskiy, M.S. Kovalchuk, D.E. Batueva, **N.D. Senchilo** // Sustainability. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. – Vol. 13 – № 24 – P. 13801. DOI:10.3390/su132413801 (Scopus).

Публикации в прочих изданиях:

8. **Senchilo, N.** Application of the large capacity accumulators in the mining industry for the purpose of efficient use of energy resources with a high share of alternative energy sources on the example of the city Suchjou in China / N. Senchilo. // Proceedings of 59 Konferencja Studentckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH 6 grudnia 2018. – 2018 – С. 162.

9. **Senchilo, N.** Economic assessment of energy efficiency of electricity supply to mining enterprise by distributed energy resources. / N. Senchilo. // Efficiency and Sustainability in the Mineral Industry | Scientific reports on resource issues – 2019. – Т. 1. – С. 353-357.

10. **Сенчило, Н.Д.** Системный анализ электроэнергетической системы в рамках создания концепции автоматизированной сети электроснабжения для повышения надежности и устойчивости системы. / Н. Д. Сенчило. – 2019. – Анализ и прогнозирование систем

управления в промышленности и транспорте | Труды XIX Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов. Сборник трудов конференции, г. Санкт-Петербург 25-27 апреля 2019 г. – С. 125-129.

Патент и свидетельство:

11. Патент № 2719507 Российская Федерация, СПК G06N 3/02 (2020.02); G01R 31/34 (2020.02); G06F 17/10 (2020.02); G06F 17/14 (2020.02). Способ оценки технического состояния потребителя-регулятора на основе нейросетевого диагностирования : №2019142517 : заявл. 16.12.2019 : опубл. 20.04.2020 / Абрамович Б.Н., **Сенчило Н.Д.**, Бабанова И.С.; заявитель и правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». - 16 с. : ил.

12. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2021680830, Российская Федерация. Программа для определения оптимальной ёмкости системы накопления электроэнергии для промышленного предприятия на основе прогноза электропотребления : №2001610251/69; заявл. 07.12.2021; опубл. 15.12.2021. / **Сенчило Н.Д.**; заявитель и правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 13 кБ.

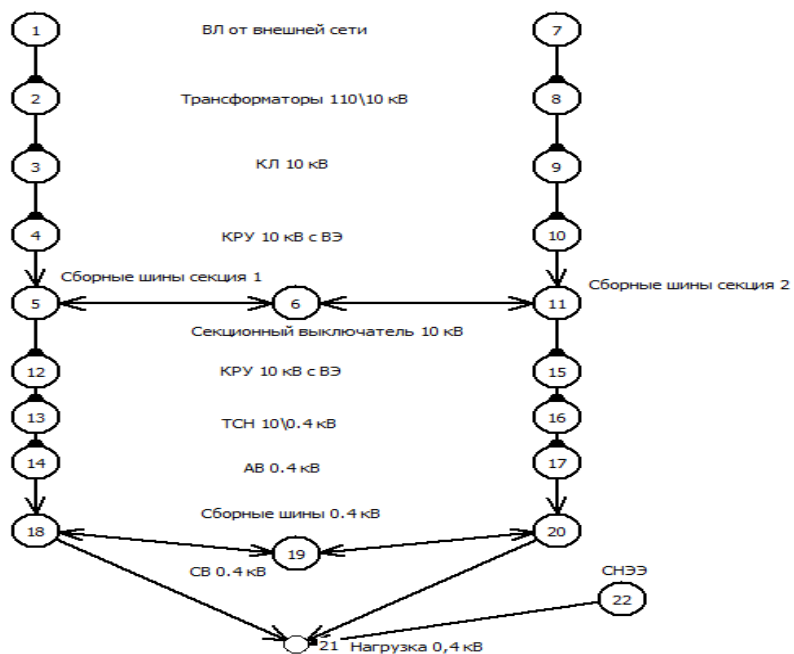


Рисунок 1 – схема функциональной целостности электротехнического комплекса КС МГ

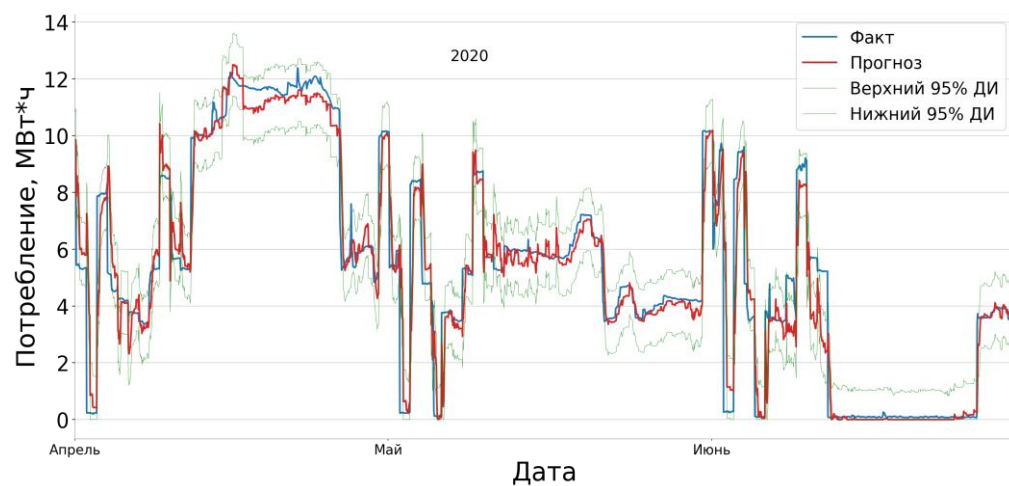


Рисунок 6 – результаты прогноза с использованием модели регрессионно-классификационных деревьев

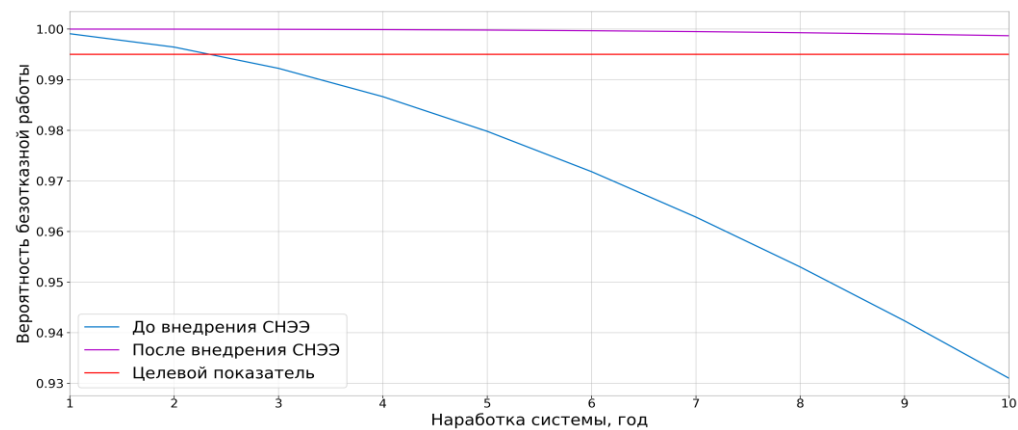


Рисунок 3 – зависимость изменения вероятности безотказной работы особо ответственных потребителей КС от времени эксплуатации

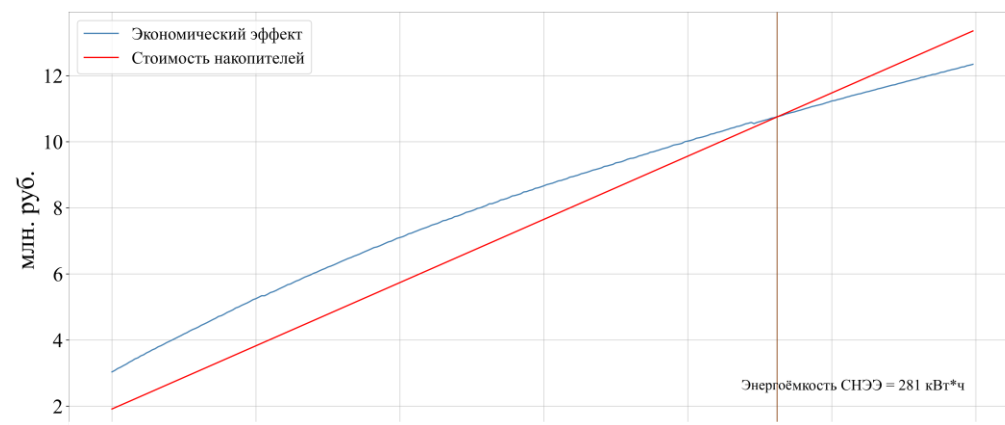


Рисунок 9 – сравнение экономического эффекта и затрат на установку и использование СНЭЭ

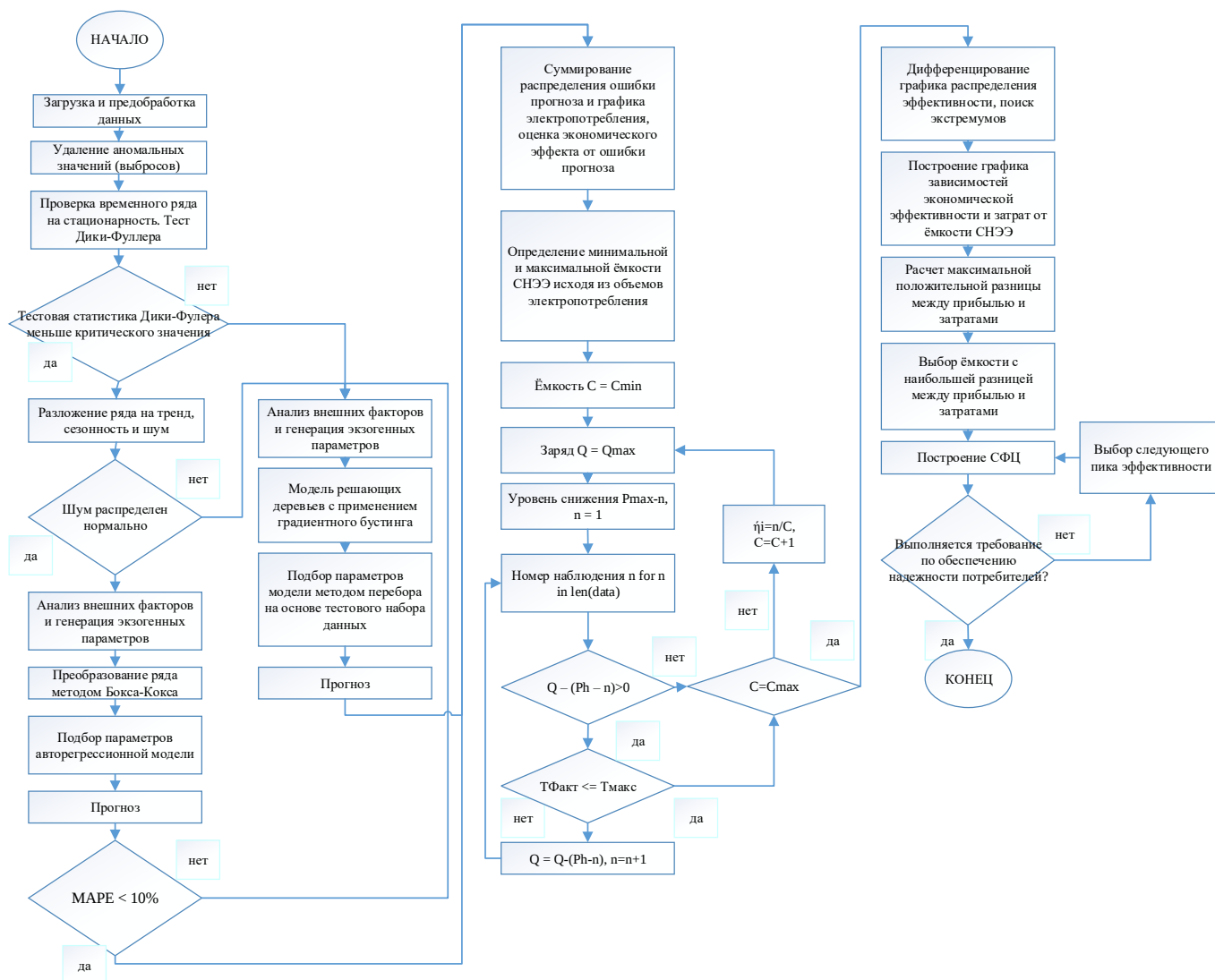


Рисунок 7 - Алгоритм определения энергоёмкости СНЭЭ на основе среднесрочного прогноза электропотребления