

На правах рукописи

Васильков Олег Сергеевич



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГОРНО-
ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

*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:

Артюхов Иван Иванович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», кафедра «Электроэнергетика и электротехника», профессор;

Андреенков Евгений Сергеевич

кандидат технических наук, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, кафедра «Электроэнергетические системы», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Защита диссертации состоится 28 сентября 2021 г. в 16:00 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 Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из основных показателей энергоэффективности использования поступающей на предприятие электроэнергии является график электрической нагрузки (ГЭН). Анализ изменения ГЭН показывает, что неравномерность нагрузки имеет тенденцию к росту, суточные графики нагрузки современных энергосистем имеют, как правило, два явно выраженных пика, между пиками находится зона сниженной нагрузки, а еще более глубокое снижение наблюдается в течение ночных часов.

В свою очередь, увеличение неравномерности ГЭН ведет к снижению энергоэффективности производства, передачи и потребления электроэнергии, происходит увеличение потерь электроэнергии в сетях, сокращается срок службы оборудования, в особенности кабельных линий.

Сложившиеся подходы к формированию энергоэффективных режимов электроснабжения предприятий основываются на толковании двух принципиально различных понятий: «электроснабжение» и «электропотребление» - как единого процесса электроснабжения. Такая трактовка обусловлена отсутствием систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) в составе систем электроснабжения предприятий. Отсутствие возможности аккумулировать электроэнергию в периоды минимальных нагрузок и рационально использовать при возникновении дефицита генерируемой мощности формирует неправильное в физическом аспекте представление о процессе электропотребления. В настоящее время проблему повышения энергоэффективности систем электроснабжения (СЭС) решают за счет минимизации затрат на их строительство с учетом поэтапного роста нагрузок. При таком подходе не рассматривается возможность применения систем накопления электроэнергии.

Учитывая тот факт, что технологический прогресс, привел к уменьшению стоимости СНЭЭ до приемлемого для потребителей уровня, одновременно обеспечив улучшение их эксплуатационных характеристик, а также рост коэффициента полезного действия и

снижения операционных затрат, что в совокупности позволяет рассматривать их в качестве элементов СЭС, участвующих в регулировании графика электрических нагрузок.

Однако использование СНЭЭ требует разработки рационального подхода к определению параметров, места установки и алгоритмов функционирования. Ошибочный выбор СНЭЭ может стать причиной экономической неэффективности её применения и привести к снижению энергоэффективности всего предприятия.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в разработку методов регулирования графиков нагрузки внесли: Г.С. Хронусов, В.В. Михайлов, Б.П. Лебедев, Б.Н. Абрамович, А.В. Проховник, и др. Вопросами разработки и исследования применения систем накопления электроэнергии занимались Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, А.Г. Тер-Газарян, Н.Л. Новиков, В.Е. Фортов, Ч.У. Курувита Араччиге, А. Oudalov, R.A. Dougal и др.

При рассмотрении вопроса регулирования графиков нагрузки развивались две основные теории – смещение пиков потребления и разуплотнение графиков нагрузки. Обе теории строились на использовании на промышленных предприятиях потребителей-регуляторов. Однако, использование данных электроприемников осложняется тем, что суточные графики электропотребления основных энергосистем промышленных предприятий стали характеризоваться наличием двух, практически одинаковых максимумов. В связи с этим реальный эффект снижения потребности в мощности возможен только при сбалансированном снижении как утреннего, так и вечернего максимумов.

Альтернативой применению потребителей-регуляторов мощности может стать использование СНЭЭ. Диссертации посвящены разработке методов оптимального размещения накопителей электроэнергии в системах электроснабжения с целью выравнивания суммарного графика нагрузки и минимизации потерь электроэнергии. Однако в данных работах не уделяется должного внимания алгоритмам функционирования СНЭЭ, а также данные устройства не рассматриваются в качестве сложных систем,

состоящих из подсистем накопления, преобразования, контроля и управления, в связи с чем не учитываются некоторые функциональные особенности при определении места установки.

Соответствие паспорту специальности. 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.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Объект исследования – электротехнические комплексы горно-обогатительных предприятий с СНЭЭ.

Предмет исследований – регулирование графиков нагрузки с использованием СНЭЭ.

Цель работы – повышение энергоэффективности электротехнических комплексов горно-обогатительных предприятий за счет регулирования графиков нагрузки с использованием систем накопления электроэнергии

Идея работы – разработка алгоритмов определения места установки и функционирования систем накопления электроэнергии для повышения эффективности регулирования графиков нагрузки.

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

1. Проанализировать существующие системы накопления электроэнергии, способы их применения. Обосновать необходимость разработки новых методов, связанных с определением места установки, алгоритма функционирования и структуры СНЭЭ;

2. Провести анализ структуры системы электроснабжения предприятий и разработать алгоритм определения оптимального места установки СНЭЭ;

3. Разработать метод краткосрочного прогнозирования электрических нагрузок;

4. Проанализировать существующие методы оптимизации алгоритмов функционирования сложных систем и выявить наиболее подходящий для определения стратегии управления системой накопления электроэнергии;

5. Определить влияние от внедрения СНЭЭ на показатели качества в точке подключения, провести имитационное моделирование и экспериментальные исследования;

6. Разработать алгоритм выбора методов и средств по снижению влияния СНЭЭ на искажения напряжения питающей сети.

Научная новизна работы:

1. Введен критерий ΔDp , основанный на учете дисперсии и взаимной корреляции графиков нагрузки, позволяющий оценить эффективность их регулирования в узлах системы электроснабжения предприятия.

2. Разработан новый алгоритм определения места установки СНЭЭ, основанный на структурном анализе системы электроснабжения и применении вновь введенного критерия ΔDp ;

3. Разработана модель управления СНЭЭ на основе методов краткосрочного прогнозирования графика нагрузки и метода динамического программирования;

4. Установлена зависимость THDI выходного тока инвертора от мощности заряда/разряда и разработан алгоритм выбора методов и средств по обеспечению электромагнитной совместимости при работе нагрузки и СНЭЭ, позволяющий снизить влияние гибридных инверторов на искажение напряжения питающей сети.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Разработан комплексный подход для решения задач, связанных с внедрением СНЭЭ в систему электроснабжения предприятия, позволяющий добиться максимального экономического эффекта.

2. Результаты исследования внедрены в учебный процесс и в производственной деятельности АО «НПО «РИВС».

Методология и методы исследований. В работе использованы методы теории электрических цепей, систем электроснабжения электротехнических комплексов, алгоритмизация математическое и имитационного моделирования процессов в программно-вычислительном комплексе Matlab/Simulink.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Алгоритм определения мест установки систем накопления электроэнергии для повышения эффективности регулирования электропотребления, в основе которого лежит оценка изменения дисперсии графиков нагрузки узлов системы электроснабжения предприятия.

2. Максимальный уровень выравнивания графика нагрузки с учетом эксплуатационных ограничений СНЭЭ может быть достигнут за счет применения разработанного алгоритма функционирования системы накопления электроэнергии, основанного на методах краткосрочного прогноза электрических нагрузок и методе динамического программирования.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования. Адекватность методов, используемых в работе, подтверждается математическим обоснованием созданных зависимостей и имитационным моделированием с применением апробированного программно-моделирующего комплекса Matlab Simulink, экспериментальными исследованиями, а также обсуждением основных результатов работы в рамках конференций и дискуссий по опубликованным статьям.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» – 2018, 2019, 2020 - Санкт-Петербург; Российская энергетическая неделя – 2017, 2018, Москва; Международная конференция IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering – 2019, Санкт-Петербург; International Scientific Electric Power Conference ISEPC – 2019, Санкт-

Петербург; 62 Международная научная конференция на базе Горно-геологического университета им. И. Рылъски – 2020, София, Болгария; XVIII Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» – 2020, Санкт-Петербург.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; в разработке алгоритмов, направленных на эффективное использование систем накопления электроэнергии; научно-техническом обосновании разработки имитационных моделей и экспериментальных исследований; формулировке основных научных положений и выводов, определении направлений дальнейшего развития научных исследований по указанной тематике, а также в подготовке текстов научных публикаций и апробации основных положений работы.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 6 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 учёной 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 государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы.

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 85 наименований. Диссертация изложена на 100 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунков и 14 таблиц, 6 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено общее описание работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе определены предпосылки применения систем накопления электроэнергии. «Накопительная революция», обусловленная технологическим прогрессом, позволяет интегрировать СНЭЭ в системы электроснабжения для решения широкого спектра задач. Проведен сравнительный анализ типов подсистем накопления, применяемых в составе СНЭЭ. Установлено, что решению задачи выравнивания графиков нагрузки в наибольшей мере соответствуют системы накопления электрической энергии с подсистемами накопления электрохимического типа. При этом наиболее перспективной и рекомендуемой к использованию является подсистема накопления электрохимического типа на базе литий-ионных аккумуляторных батарей. На основании анализа существующих подходов к выбору мест размещения и алгоритмов функционирования СНЭЭ было установлено, что данные алгоритмы можно разделить на интеллектуальные, такие как эволюционные алгоритмы или метод роя частиц и классические – метод динамического программирования (ДП) и алгоритмы с использованием градиента. Интеллектуальные алгоритмы могут решать задачи, включая разрывные и нелинейные ограничения, но они не могут гарантировать реализацию глобального оптимального решения, и их параметры трудно подобрать. Классические алгоритмы чувствительны к начальной точке и не имеют возможности обрабатывать прерывистые ограничения. В работе будем рассматривать именно классические алгоритмы, так как главным преимуществом данного метода является получение оптимального решения для сложных задач.

Во второй главе проведен анализ структуры систем электроснабжения горно-обогатительных предприятий и определены требования к месту установки СНЭЭ. Для решения задачи определения места установки СНЭЭ предлагается использовать следующий алгоритм, в основе которого лежит анализ

взаимной корреляции графиков нагрузки. Блок-схема разработанного алгоритма приведена на рисунке 1.

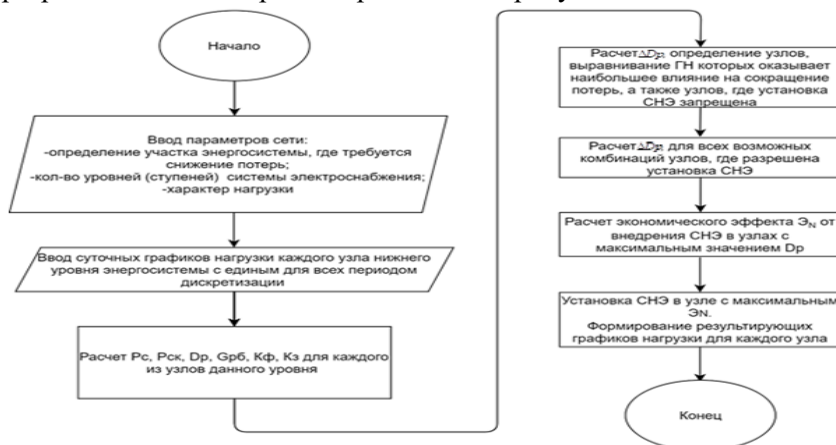


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма выбора места установки СНЭЭ

На первом этапе происходит постановка задачи, указывается участок энергосистемы где требуется снижение потерь. В системах электроснабжения обычно выделяют шесть уровней (ступеней) электроснабжения. Рекомендуемыми для установки СНЭЭ являются 2-5 уровни, так как первый уровень – это отдельные электроприемники, однако, установка накопителя непосредственно у приемника весьма затруднительна. Также стоит отметить, что индивидуальные графики нагрузок потребителей с резкопеременным характером не поддаются регулированию. Обычно такие потребители объединяются в группы и питаются по отдельным фидерам. Установка же СНЭЭ на шестом уровне затруднительна, поскольку подсистемы преобразования и согласования с сетью на данный уровень напряжения реализовать весьма проблематично. Таким образом, выделяются уровни и узлы на указанном участке энергосистемы. Далее вводятся суточные графики для нижнего уровня выбранного участка энергосистемы с единым периодом дискретизации и рассчитываются перечисленные показатели графиков нагрузки:

Затем предлагается использовать следующий критерий выбора места установки накопителя электроэнергии. Учитывая тот факт, что добиться сокращения потерь в сетях можно путем минимизации дисперсии графиков нагрузки в узлах энергосистемы, место установки СНЭЭ будем выбирать таким образом, чтобы обеспечить минимальное значение Dp не только в выбранном узле(ах), но и в системе в целом.

Для того чтобы оценить, как изменение формы графика нагрузки в одном узле повлияет на значение Dp в узлах уровнем выше и энергосистемы в целом, воспользуемся взаимнокорреляционной функцией графиков нагрузки (1):

$$kp_{rs} = \left[\frac{1}{t_u} \left(\int_0^{t_u-\tau} p_r(t)p_s(t+\tau)dt + \int_{t_u-\tau}^{t_u} p_r(t)p_s(t-t_u+\tau)dt \right) \right] - p_{rc}p_{sc}, \quad (1)$$

где $p_r(t), p_s(t)$ – графики нагрузки двух узлов, p_{rc}, p_{sc} – среднее значение мощности двух узлов, t_u – время цикла.

Данный коэффициент может принимать как положительное, так и отрицательное значение, что, как будет показано далее, влияет на значение дисперсии.

Знание данного коэффициента позволит рассчитать значения дисперсии групповых графиков нагрузки (2):

$$Dp = \sum_{r=1}^n p_{rc}^2 + 2 \sum_{r<s} (kp_{rs} + p_{rc}p_{sc}) - \left(\sum_r p_{rc}^2 + 2 \sum_{r<s} p_{rc}p_{sc} \right) = \sum_{r=1}^n Dp_r + 2 \sum_{r<s} kp_{rs}. \quad (2)$$

Анализируя выражение (2), стоит отметить, что уменьшить значение Dp можно за счет снижения дисперсии графиков нагрузки отдельных узлов, а также за счет минимизации значения их коэффициента взаимно корреляции. Регулирование графиков нагрузки за счет применения СНЭЭ позволят воздействовать на обе величины, в отличие от методов связанных с использованием потребителей-регуляторов, когда оказывается влияние именно на корреляционную составляющую дисперсии. Учитывая это, для

количественной оценки вклада в дисперсию энергосистемы предприятия и, соответственно, в потери предлагается использовать следующие выражения (3):

$$\Delta Dp_n = Dp_k + 2 \sum_k^t kp_{kt}; \Delta Dp_m = \sum_{n \in m} \Delta Dp_n; \Delta Dp = Dp_k + \sum_{m=2}^N Dp_m, \quad (3)$$

где Dp_k — дисперсия в узле k , в котором предполагается установка СНЭЭ, kp_{kt} — максимальное значение взаимно корреляционной функции всех комбинаций узлов от k до t , входящих в состав узла n , располагающегося уровнем выше, ΔDp_n — изменение дисперсии в узле n , ΔDp_m — изменение дисперсии на уровне m , в нашем случае $m = 2 \dots N$, где $N = 5$, ΔDp — изменение дисперсии в энергосистеме.

Таким образом, выражения (3) позволяют рассчитать предельное значение изменения дисперсии в отдельных узлах, на разных уровнях энергосистемы и в энергосистеме в целом, т.е. определить насколько уменьшится дисперсия графика нагрузки энергосистемы за счет установки СНЭЭ в одном из ее узлов. Чем больше величина ΔDp , тем «сильнее» поддается регулированию график нагрузки в том или ином узле, и тем большего экономического эффекта от его выравнивания можно добиться.

В случае если ΔDp_m или ΔDp имеет отрицательное значение, установка СНЭЭ в выбранном узле не рекомендуется, поскольку выравнивание графика нагрузки в нем ведет к увеличению неравномерности в узлах уровнем выше.

Приведенные выражения справедливы и для случая, когда СНЭЭ устанавливается в нескольких узлах (4):

$$\Delta Dp_n = \sum_k^t Dp_k + 2 \sum_k^t kp_{kt}; \Delta Dp_m = \sum_{n \in m} \Delta Dp_n; \Delta Dp = \sum_k^t Dp_k + \sum_{m=2}^N Dp_m, \quad (4)$$

Данное выражения позволяют вычислить изменение дисперсии при установке СНЭЭ в узлах $k \dots t$.

В третьей главе приводится математическое описание разработанной модели управления СНЭЭ. Для выбора оптимальной стратегии заряда/разряда СНЭЭ предлагается использовать следующую модель (Рисунок 2).

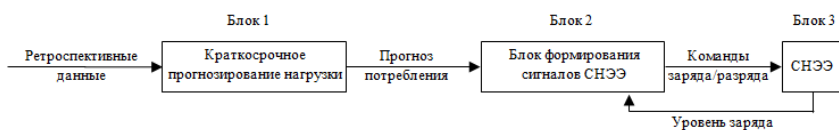


Рисунок 2 –. Блок-схема модели управления СНЭЭ с использованием краткосрочного прогнозирования и динамического программирования

Блок 1 – блок прогнозирования нагрузки. Данный блок снабжает основной исходной информацией Блок 2. Знание графика нагрузки следующих суток позволит оптимально выстроить циклы заряда/разряда СНЭЭ. В работе рассматриваются три способа прогнозирования из разных категорий: регрессионный методы прогнозирования, обобщенный метод экспоненциального сглаживания и искусственные нейронные сети (ИНС). Каждый из указанных методов был реализован в программной среде Matlab. Для реализации классических методов использовались общеизвестные зависимости, а искусственные нейронные сети были реализованы с помощью пакета прикладных программ Neural Networks Fitting. Была построена многослойная искусственная нейронная сеть прямого распространения с использованием алгоритма обратного распространения ошибки.

В рамках исследования была поставлена задача оценки влияния характера нагрузки на погрешность прогнозирования, так как анализ графиков нагрузки различных узлов системы электроснабжения предприятия показывает, что равномерность потребления электроэнергии в них отличается существенным образом, что, в свою очередь, может повлиять на точность прогноза. Для решения данной задачи моделировались графики нагрузки с различными коэффициентами формы.

В результате моделирования были получены значения средней абсолютной ошибки (MAPE) для каждого из выбранных

способов прогнозирования при различных коэффициентах формы прогнозируемого графика нагрузки (Таблица 1). MAPE – средняя абсолютная процентная ошибка прогнозирования. Данная оценка применяется для временных рядов, фактические значения которых значительно больше 1. Например, для электропотребления, оценка ошибки прогнозирования (5):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{p_{факт}(i) - p_{пр}(i)}{p_{факт}(i)} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $p_{факт}(i)$ – фактическое (реальное) значение мощности, $p_{пр}(i)$ – прогнозируемое значение мощности, n – количество периодов.

Таблица 1 – Значение средней абсолютной погрешности (MAPE)

Значение коэффициента формы K_{ϕ}	1,005	1,05	1,1
Регрессионные метод прогнозирования	8,84%	12,64%	14,65%
Метод экспоненциальное сглаживание	8,4%	15,67%	19,0%
Искусственная нейронная сеть	3,77%	6,14%	10,3%

В результате можно сделать вывод, что с увеличением неравномерности, точность прогноза классических методов значительно ухудшается. При значении $K_{\phi} < 1.05$ точность прогноза ИНС находится в допустимых пределах. В предложенной модели будем применять именно ИНС.

Блок 2 – блок формирования сигналов управления. Здесь прогнозируемая кривая графика нагрузки обновляется при получении новых данных, а стратегия заряда/разряда корректируется с использованием метода динамического программирования.

При решении оптимизационной задачи для выбора стратегии заряда/разряда СНЭЭ целью, как отмечалось ранее, является минимизация дисперсии графика нагрузки (6):

$$\min f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((p_{np}(i) + p_{з/р}(i)) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{np}(i) + p_{з/р}(i)) \right)^2 \quad (6)$$

где $p_{з/р}(i)$ – выходная мощность СНЭЭ, со знаком «+» при заряде и «-» при разряде.

Алгоритм ДП позволяет ввести ряд эксплуатационных ограничений:

- ограничение мощности:

оставшаяся емкость аккумулятора на каждом этапе находится в допустимом диапазоне. При управлении в режиме реального времени оставшаяся емкость аккумулятора в текущий момент является начальным значением, а оставшаяся емкость аккумулятора на последнем этапе является конечным значением.

- ограничение числа циклов заряда/разряда:

данное ограничение влияет на срок службы накопителя электроэнергии (НЭЭ) и, соответственно, на экономическую эффективность.

- ограничение глубины разряда (DOD):

данное ограничение также связано с условиями эксплуатации НЭЭ.

Суть алгоритма ДП заключается в следующем. Необходимо разделить прогнозируемый день на n этапов, временной интервал которых равен Δt . Энергоемкость накопителя электроэнергии C выберем в качестве переменной состояния. C определяется на каждом шаге алгоритма ДП. Разность емкостей соседних состояний ΔC . Исходное состояние – это энергоемкость батареи, которая рассчитывается на текущем этапе; конечное состояние определяется на стадии n .

Оптимальное решение в ДП – это наикратчайший путь от начального состояния до конечного состояния. Необходимо вычислить индикаторную функцию $f(c(i))$ ($m < i \leq n$) каждого состояния $c(i)$ от текущего этапа до этапа n по формуле рекурсии

$$f(c(i)) = \min_{p_{з/р}(i) \in d(c(i))} \{ f(c(i-1)) + v_i(p_{з/р}(i)) \}, \text{ в котором } c(i) -$$

одно из состояний на этапе i , $d(c(i))$ - набор решений, включающий все возможные решения состояния $c(i)$, выходная мощность СНЭЭ $p_{з/р}(i)$ является переменной решения.

Индикаторная функция

$$f(c(n)) = \min_{p_{з/р}(n) \in d(c(n))} \{f(c(n-1)) + v_n(p_{з/р}(n))\}$$
 это цель модели оптимизации.

Алгоритмы ДП требуют, чтобы переменные решения целевой функции в модели оптимизации на разных этапах должны быть аддитивны и рекурсивны.

Значение $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{нр}(i) + p_{з/р}(i))$ является постоянным, а

цель может быть упрощена до $\min f = \sum_{i=1}^n ((p_{нр}(i) + p_{з/р}(i)))^2$.

Данная функция аддитивна и рекурсивна, тем самым удовлетворяет требованиям алгоритма ДП. Таким образом, на каждой стадии i – $v_i(p_{з/р}(i)) = ((p_{нр}(i) + p_{з/р}(i)))^2$.

Блок 3 – система накопления электроэнергии. Данный блок представляет собой стандартную структуру СНЭЭ, в нем происходит обмен сигналами между подсистемами накопления и преобразования электроэнергии и Блоком 2. Применение алгоритма ДП в связке с прогнозированием нагрузки позволит рассчитать значения энергоемкости, максимальной мощности СНЭЭ и число циклов заряда/разряда.

Разработанный алгоритм определения оптимальной стратегии заряда/разряда СНЭЭ представлен на рисунке 3.

В четвертой главе приведены результаты имитационного моделирования и экспериментальных исследований для оценки влияния СНЭЭ на качество электроэнергии в точке общего подключения. Были проведены исследования в лабораторных условиях с применением трехфазного гибридного инвертора и аккумуляторной батареи (АБ). Инвертор был подключен к

электрической сети на параллельную работу для питания нагрузки в виде активного сопротивления. Применялся гибридный инвертор МАП Hybrid. Внешний вид лабораторной установки представлен на рисунке 4.

Исследовались режимы заряда АБ и выдачи мощности в сеть при двух вариациях сопротивления системы. При этом к установке была подключена линейная нагрузка в виде активного сопротивления мощностью 4.5 кВт. Выдаваемая мощность от инвертора варьировалась в пределах от 500 Вт до 2 кВт в режиме генерации электроэнергии в сеть, и в пределах от 50 до 300 Вт в режиме заряда АБ. В результате лабораторных исследований были получены зависимости суммарных гармонических искажений тока (THDI) при различных режимах работы инвертора и сопротивлениях системы. На рисунке 5 представлена зависимость выходной мощности инвертора и THDI выходного тока инвертора от времени. Из графика видно, что с увеличением выходной мощности инвертора снижается THDI выходного тока. Аналогичная зависимость была получена и для режима заряда АБ. В этом случае гармонический состав тока соответствует режиму работы шестипульсного выпрямителя, а искажения в токе уменьшаются при увеличении потребляемой мощности. На рисунке 6 представлен график, характеризующий THDI выходного тока инвертора в различных режимах работы (заряд АБ и выдача мощности в сеть) в зависимости от сопротивления петли фаза-ноль. Из графика видно, что в рассматриваемых режимах THDI выходного тока инвертора уменьшается при подключении дополнительного сопротивления в линию, т.е. при увеличении сопротивления системы.

Полученные экспериментальные результаты подтверждает результаты имитационного моделирования.

На основании полученных результатов исследований был разработан алгоритм выбора методов и средств по обеспечению электромагнитной совместимости при работе нагрузки и гибридного инвертора с накопителем энергии, позволяющий снизить влияние гибридных инверторов на искажение напряжения питающей сети. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – совершенствование использования систем накопления электроэнергии в электротехнических комплексах горно-обогатительных предприятий. По результатам диссертационной работы сделаны следующие выводы и представлены следующие рекомендации:

1. Выполнен обзор и анализ существующих систем накопления электроэнергии, способов их применения. Обоснована необходимость разработки новых методов, связанных с определением места установки, алгоритма функционирования и структуры СНЭЭ;
2. Введен критерий ΔDp , позволяющий оценить эффект от регулирования графика нагрузки в узлах системы электроснабжения предприятия, разработан алгоритм определения места установки СНЭЭ, основанный на применении данного критерия. Установлено, что чем больше величина ΔDp , тем «сильнее» поддается регулированию график нагрузки в том или ином узле, и тем большего экономического эффекта от его выравнивания можно добиться. В случае если ΔDp имеет отрицательное значение, установка СНЭЭ в выбранном узле не рекомендуется;
3. Разработан комбинированный метод краткосрочного прогнозирования электрических нагрузок, позволяющий повысить точность прогнозирования. Разработана программа для ЭВМ и получено свидетельство о ее государственной регистрации №2020660849 «Программа для прогноза суточного графика нагрузки предприятия с использованием различных методов прогнозирования»;
4. Предложен алгоритм функционирования СНЭЭ на основе разработанного метода краткосрочного прогнозирования графика нагрузки и метода динамического программирования. Отличительной чертой данного алгоритма является нахождение оптимального режима работы СНЭЭ, при котором происходит максимальное выравнивание графика нагрузки, но при этом

соблюдается ряд эксплуатационных ограничений, направленных на продление жизненного цикла НЭЭ, что в свою очередь ведет к повышению экономической эффективности;

5. Выявлены дополнительные критерии при определении размера и структуры СНЭЭ, учитывающие ее влияние на показатели качества электроэнергии в точке подключения. Установлено, что повышение выходной мощности инвертора приводит к снижению искажения выходного тока, что целесообразно осуществить в случае наличия резерва по мощности инвертора и накопителя энергии;

6. Предложен алгоритм выбора методов и средств по обеспечению электромагнитной совместимости СНЭЭ, позволяющий снизить влияние на искажение напряжения питающей сети;

7. Получен акт о внедрении результатов исследования в образовательный процесс Горного университета и справка о внедрении результатов в производственную деятельность АО «НПО «РИВС».

Направлением дальнейших исследований является усовершенствование методики определения места установки системы накопления электроэнергии, а также развитие алгоритмов функционирования подобных систем.

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. Паляницын – Текст: непосредственный // Известия МГТУ «МАМИ». – 2020. – №1. – С. 27 – 34.

2. Васильков, О.С. Разработка алгоритма определения мест подключения систем накопления электроэнергии / О.С. Васильков, Я. Э. Шклярский – Текст: непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 165 – 173.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus

3. Vasilkov, O.S. Features of application hybrid energy storage in power supply systems / O. S. Vasilkov, V. S. Dobysh. – DOI 10.1109/EIConRus.2019.8656802. – Текст: электронный // IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2019. – P. 728-730.

4. Bardanov, A.I. Modeling the process of redistributing power consumption using energy storage system with various configurations to align the electrical loads schedule / A. I. Bardanov, O.S. Vasilkov, T. V. Pudkova. – DOI doi:10.1088/1742-6596/1753/1/012013. – Текст: электронный // International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering (IPDME). – 2020. – Vol. 1753. – 012013.

5. Zhukovsky, Yu.L. Potential for electric consumption management in the conditions of an isolated energy system in a remote population / Yu. L. Zhukovsky, A.Yu. Lavrik, A.V. Semenyuk, O.S. Vasilkov. – DOI: 10.21177/1998/4502/2020/12/4/583/591. – Текст: электронный // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2020. – №4(46) – P. 583 – 591.

Публикации в прочих изданиях:

6. Васильков, О.С. Анализ и регулирование графиков нагрузки промышленных предприятий / А.И. Барданов., О.С. Васильков, Т.В. Пудкова– Текст: электронный // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020». – 2020. – С. 452 – 456.

Свидетельство:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661597. Программа для прогноза суточного графика нагрузки предприятия с использованием различных методов прогнозирования / О. С. Васильков, С. В. Соловьев; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет. – № 2020660849; заявл. 24.09.2020, зарегистр. 28.09.2020; опубл. 28.09.2020 – 1 с.

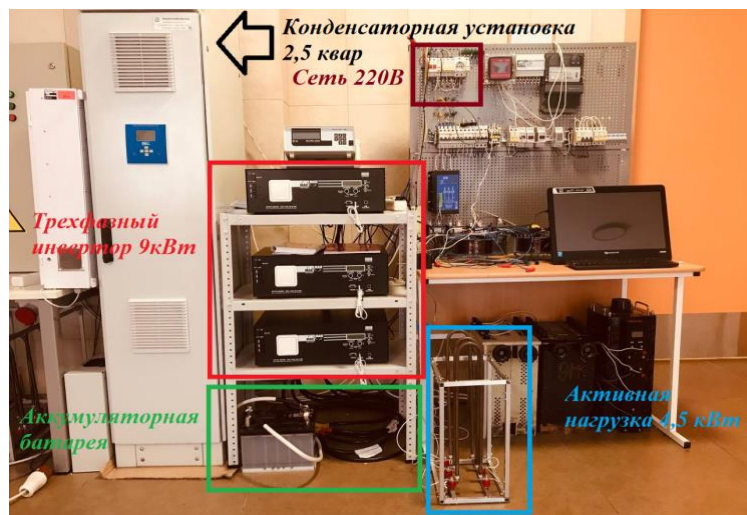


Рисунок 4 – Лабораторная установка

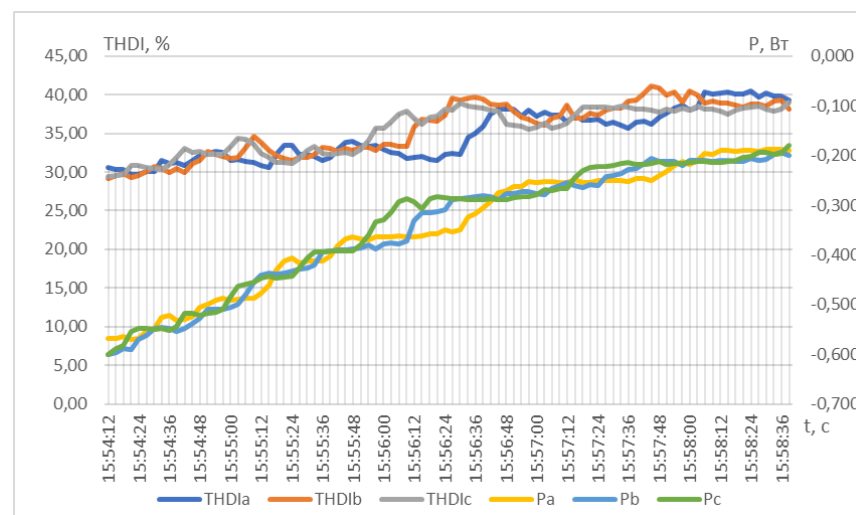


Рисунок 5 – Зависимость выходной мощности инвертора и THDI выходного тока от времени

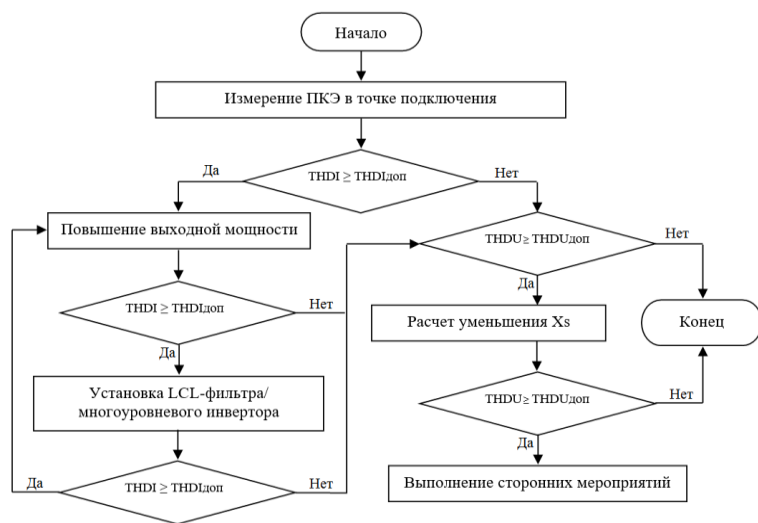


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма выбора методов и средств по снижению влияния гибридных инверторов на искажение напряжения питающей сети

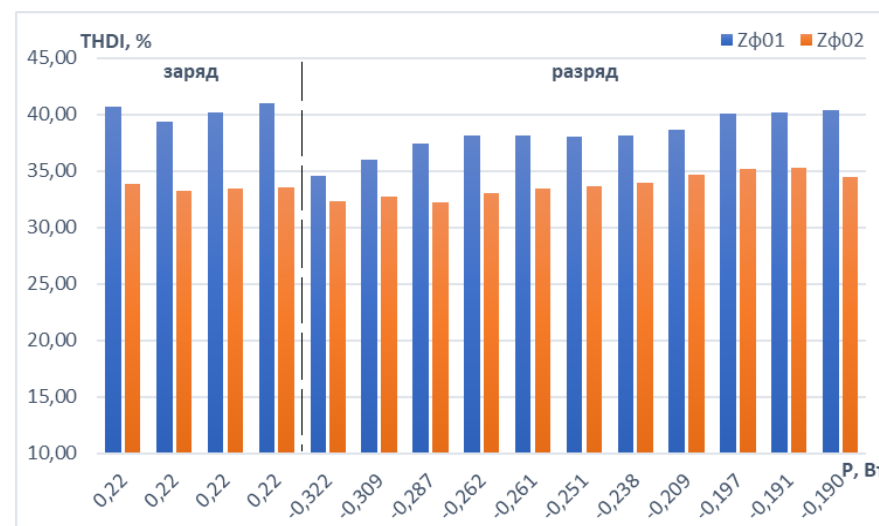


Рисунок 6 – Зависимость THDI выходного тока инвертора от мощности заряда/разряда и сопротивления петли фаза-ноль

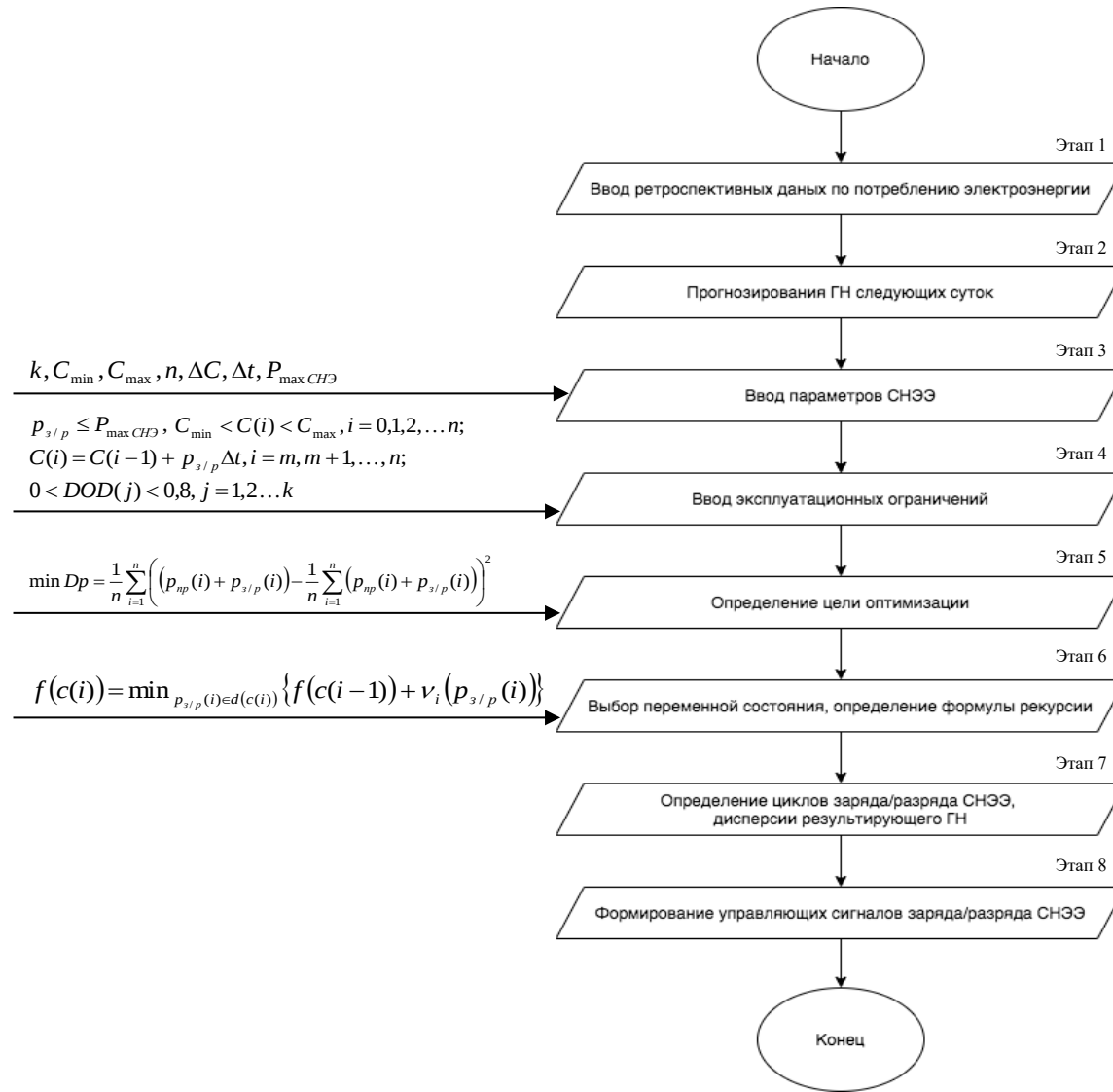


Рисунок 3 – Алгоритм определения оптимальной стратегии заряда/разряда СНЭЭ