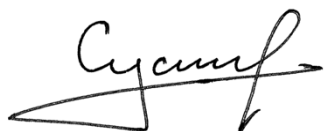


На правах рукописи

Сусликов Павел Константинович



**УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ
АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ ПУТЁМ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ПАТТЕРНОВ И КЛАССИФИКАЦИИ НАГРУЗОК**

*Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы
и системы*

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

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Жуковский Юрий Леонидович

Официальные оппоненты:

Суслов Константин Витальевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, профессор;

Клюев Роман Владимирович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», кафедра электроснабжения промышленных предприятий, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г Москва.

Защита диссертации состоится **29 сентября 2026 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

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

Автореферат разослан 29 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена ростом потребления электроэнергии (ЭЭ) в мире и Российской Федерации, повышением волатильности энергорынков, ужесточением климатических и технологических требований к предприятиям, а также необходимостью повышения эффективности использования ЭЭ в условиях ограниченности энергетических ресурсов и роста их стоимости.

Промышленный сектор в России устойчиво доминирует в структуре электропотребления, а потому именно в промышленности сосредоточен наибольший потенциал получения технико-экономического эффекта от мероприятий по повышению энергоэффективности.

Особую значимость задача приобретает для изолированных и труднодоступных территорий, занимающих около 65 % площади Российской Федерации, а также для удалённых промышленных объектов и Арктической зоны, где электроснабжение осуществляется преимущественно посредством автономных электротехнических комплексов (ЭТК) с гибридной генерацией. Для таких ЭТК характерны высокая стоимость ЭЭ, ограниченные возможности резервирования и необходимость покрытия роста нагрузки за счёт строительства новой генерации, что сопровождается значительными капитальными затратами.

В этих условиях особую актуальность приобретают технологические решения, позволяющие повысить эффективность работы автономных ЭТК с гибридной генерацией без масштабной модернизации их структуры, прежде всего, это методы, позволяющие вовлечь конечных потребителей в процесс управления эффективностью работы рассматриваемого ЭТК.

Степень разработанности темы исследования. Проблемы повышения эффективности автономных ЭТК с гибри-

ной генерацией, включая вопросы оптимизации режимов, интеграции ВИЭ и накопителей, а также управления изолированными микросетями, освещены в работах Лукутина Б.В., Елистратова В.В., Абрамовича Б.Н., Бельского А.А., Лаврика А.Ю., Нестеренко Г.Б., Euyimaуa S., Manandhar U. и других авторов.

Вопросы управления спросом на электроэнергию и количественной оценки гибкости нагрузки рассмотрены в работах Ильюшина П.В., Сулова К.В., Николаева А.В., Lee E., Kim J., Vahid-Ghavidel M., Ranaboldo M., Zhang J.

Значительный вклад в развитие методов анализа временных рядов и обработки данных в задачах электроэнергетики внесли Голяндина Н., Коробейников А., Жиглявский А., Kaur R., Gabrijelčič D. и другие исследователи.

Однако в настоящее время недостаточно исследований, которые бы одновременно решали задачи количественной оценки потенциала внедрения технологии управления спросом на электроэнергию (DSM), идентификации характерных паттернов электропотребления, а также адресации управляющих воздействий DSM с учётом классификации электрических нагрузок.

Объект исследований – автономный электротехнический комплекс промышленного предприятия с гибридной генерацией.

Предмет исследований – методы и алгоритмы декомпозиции временных рядов электропотребления и классификации электрических нагрузок для разработки алгоритмов эффективного управления.

Цель работы – повышение эффективности работы автономных электротехнических комплексов с гибридной генерацией путём управления спросом на электроэнергию.

Идея заключается в том, что алгоритмы DSM, основанные на идентификации характерных паттернов потребления ЭЭ с последующим расчётом индекса потенциала управления

спросом и классификации электроприёмников, позволяют повысить эффективность работы автономного ЭТК с гибридной генерацией.

Задачи исследования:

1. Выявить научно-технические проблемы повышения эффективности работы автономных электротехнических комплексов с гибридной генерацией.

2. Проанализировать существующие методы оценки потенциала применения технологии управления спросом в автономных ЭТК с гибридной генерацией и определить существующие подходы к классификации электрических нагрузок применительно к задачам управления спросом.

3. Разработать метод выявления индивидуальных особенностей (паттернов) графика нагрузки потребителя для расчёта потенциала применения DSM в автономных ЭТК с гибридной генерацией.

4. Обосновать критерий оценки потенциала внедрения DSM в автономных ЭТК с гибридной генерацией на основе расчёта интегрального коэффициента потенциала управления спросом.

5. Обосновать классификацию нагрузок с целью её применения в качестве основы для последующей формализации подходов к управлению спросом на электроэнергию.

6. Оценить технико-экономические показатели эффективности применения разработанного алгоритма DSM на основе предложенной классификации электрических нагрузок.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что представление компонент сингулярного спектрального анализа (SSA) временного ряда электропотребления на амплитудно-частотной плоскости обеспечивает устойчивое разделение на группы паттернов при изменении режимов работы автономного электротехнического комплекса.

2. Получена зависимость интегрального индекса потенциала управления спросом на ЭЭ (DR PI) от структуры паттернов электропотребления, определяемой вкладом, амплитудой и периодичностью компонент SSA временного ряда, что позволяет количественно оценивать потенциал участия нагрузки в программах управления спросом на электроэнергию на основе характеристик её временной структуры.

3. Предложена классификация электрических нагрузок, включающая пять классов электроприёмников, позволяющая описать существующих потребителей электроэнергии в целях реализации технологии управления спросом.

4. Разработан способ управления каждым классом нагрузок в соответствии с решением оптимизационной задачи минимизации операционных затрат (ОРЕХ) на эксплуатацию автономных электротехнических комплексов с гибридной генерацией.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

п. 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

п. 3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм для выявления периодических паттернов во временных рядах потребления электроэнергии на основе группировки результатов сингулярного разложения (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025662691).

2. Предложен способ количественной оценки актуальности и потенциала применения технологии DSM в автономных ЭТК с гибридной генерацией за счёт расчёта интегрального индекса потенциала управления спросом DR PI.

3. Предложен способ повышения эффективности работы автономных ЭТК с гибридной генерацией за счёт внедрения технологии DSM с учётом предложенной классификации электроприёмников.

4. Результаты диссертационного исследования внедрены в производственную деятельность ООО «ГЦЭ – Энерго», что подтверждается актом о внедрении от 21.04.2026

Методология и методы исследования. При работе над диссертационным исследованием использовались методы анализа и обобщения данных, статистические методы обработки данных, методы математического моделирования, методы решения оптимизационных задач (в частности, класс методов роя частиц), а также элементы теории временных рядов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение DR PI, рассчитанного на основе паттернов, полученных при помощи предложенного принципа кластеризации компонент SSA временного ряда потребления ЭЭ, позволяет получить количественную оценку потенциала применения DSM в автономных ЭТК с гибридной генерацией.

2. Внедрение принципов DSM, основанных на разработанной классификации электроприёмников, обеспечивает повышение эффективности работы автономного ЭТК с гибридной генерацией.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена корректным применением стандартных методов математического и имитационного моделирования электротехнических комплексов, методов анализа временных данных, а также результатами расчётных примеров.

Апробация результатов диссертации проведена на 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных. За последние 3 года принято участие в 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных: XIV Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодёжи» (30 сентября – 04 октября 2024 г., г. Ставрополь); Международная научно-практическая конференция «Транспорт. Взгляд в будущее» (7-8 ноября 2024 г., г. Санкт-Петербург); Первая международная конференция «Искусственный интеллект и цивилизация будущего» (29 января 2025 г., г. Тегеран, Исламская Республика Иран); V Всероссийская с международным участием молодёжная конференция «Бутаковские чтения» (09-11 декабря 2025 г., г. Томск); XXXIV Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2026» (02-06 февраля 2026 г., г. Москва); XV Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодёжи» (23-27 марта 2026 г., г. Иваново); XXI Всероссийская конференция-конкурс проектов студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (6-10 апреля 2026 г., г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке задачи, формулировании целей и научных положений, анализе литературы, разработке метода выявления индивидуальных паттернов графика нагрузки потребителя и классификации электрических нагрузок с целью управления спросом, а также в моделировании и оценке предложенного подхода к управлению спросом на ЭЭ.

Публикации. Результаты диссертационного исследования 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 ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 129 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и 9 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю Жуковскому Юрию Леонидовичу за вдохновение и помощь при подготовке диссертационного исследования. Автор благодарит коллектив кафедры электроэнергетики и электромеханики и коллег центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета за содействие в рамках обучения в аспирантуре. Автор выражает благодарность семье и близким, в частности, своей супруге, Михайлюк Алине за поддержку в процессе подготовки диссертации.

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 проанализированы научно-технические проблемы повышения эффективности автономных ЭТК с ги-

бридной генерацией, рассмотрены современные меры повышения энергоэффективности, методы анализа временных рядов и существующие подходы к DSM. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрено применение метода SSA для декомпозиции временных рядов электропотребления с целью расчёта интегрального индекса потенциала управления спросом DR PI.

В третьей главе определены основные характеристики электрических нагрузок для целей управления спросом. На этой основе предложена новая классификация электрических нагрузок с целью её использования для адресного DSM.

В четвёртой главе классы нагрузок описаны как объекты управления, для каждого класса разработаны алгоритмы формирования управляющих воздействий. Выполнено сравнение двух подходов к повышению энергоэффективности: внедрение DSM и внедрение накопителей ЭЭ.

Закключение отражает обобщённые выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решёнными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Применение DR PI, рассчитанного на основе паттернов, полученных при помощи предложенного принципа кластеризации компонент SSA временного ряда потребления ЭЭ, позволяет получить количественную оценку потенциала применения DSM в автономных ЭТК с гибридной генерацией.

Существующие подходы к оценке потенциала применения технологии управления спросом на электроэнергию не обеспечивают должный уровень поддержки принятия решений по внедрению DSM ни на проектной стадии, ни в условиях действующего предприятия. По этой причине

был предложен метод, который по временному ряду потребления ЭЭ к количественной оценке потенциала DSM.

Для решения этой задачи в диссертации выбран двухэтапный подход, включающий в себя декомпозицию исходного временного ряда и последующую кластеризацию результатов разложения. Применение прямой кластеризации суточных профилей нагрузок ограничено и влечёт за собой неустойчивость кластеров при дрейфе режимов или характера потребления ЭЭ. Поэтому в работе объектом анализа становится не исходный график потребления ЭЭ, а структура его компонент.

Алгоритм получения паттернов потребления ЭЭ (рисунок 1) включает несколько последовательных этапов.

На первом этапе формируется исходный временной ряд нагрузки, полученный по данным коммерческого или технического учёта.

На втором этапе выполняется предобработка данных.

На третьем этапе временной ряд подвергается SSA анализу с фиксированным размером окна.

На четвёртом этапе компоненты SSA разложения переносятся в амплитудно-частотное пространство, как показано на рисунке 2.

На пятом этапе единичные компоненты кластеризуются в методом k-means. Полученные кластеры суммируются.

На шестом этапе выполняется реконструкция сгруппированных компонент и формируется набор устойчивых паттернов исходного временного ряда (рисунок 3).

Принципиальное отличие предложенного подхода от прямой кластеризации профилей состоит в том, что кластеризуются не сами суточные графики, а результаты SSA анализа. Это позволяет работать с различными периодиками в графике нагрузок, и тем самым повышает устойчивость

выделяемых паттернов при изменении формы исходного профиля.

Корректность и воспроизводимость этапа выделения паттернов подтверждены количественно. Установлено, что порядка 99,5 % информации исходного временного ряда восстанавливается суммированием первых 7 компонент, а автоматизированная кластеризация компонент по признакам несущей частоты и среднеквадратичной амплитуды обеспечивает устойчивость к их миграции между итоговыми группами (метрики ARI/NMI находятся на уровне 0,55-0,70). Дополнительно показано, что при изменении длины окна SSA для большинства значений сохраняется согласованность разбиений, а влияние случайной инициализации k-means остаётся низким (стандартные отклонения $\sigma_{max}^{ARI} = 0,053$; $\sigma_{max}^{NMI} = 0,036$).

Полученные паттерны используются как основа для расчёта интегрального индекса потенциала управления спросом DR PI (рисунок 4).

DR PI формируется как взвешенная сумма трёх компонент: F_1 – доли гибкой энергии в общем объёме, F_2 – коэффициента концентрации гибкой энергии во времени и F_3 – коэффициента динамики потребления электроэнергии. Тем самым индекс учитывает не только наличие потенциально управляемой энергии, но и её временную локализацию и режимную изменчивость.

Количественный характер оценки обеспечивается тем, что DR PI рассчитывается непрерывно по временному ряду и позволяет присваивать каждому временному интервалу численную меру пригодности к реализации стратегий DSM. В работе расчёт DR PI выполняется каждые 30 минут, что позволяет получать временной профиль потенциала DSM для конкретного электроприёмника/фидера/подстанции и строить

тепловые карты предпочтительных интервалов для применения DSM (рисунок 5).

Устойчивость DR PI подтверждена анализом чувствительности (рисунки 6 и 7). При локальной вариации весов среднее абсолютное отклонение индекса не превышало 2,7 % диапазона значений, а в 4 из 6 экспериментов для каждого из 8 разных объектов ранжирование трёх наиболее предпочтительных с точки зрения DSM суток сохранялось полностью. При глобальном анализе методом Монте-Карло временной профиль DR PI оказался практически инвариантным к выбору весов: большинство реализаций обеспечивают корреляцию Пирсона с базовым вариантом выше 0,95, а значительная доля – выше 0,98 (см. рисунок 4). Это подтверждает, что вывод о потенциале DSM определяется не произвольной настройкой весов, а самой структурой анализируемого профиля.

Таким образом, предложенный метод обеспечивает переход от профиля нагрузки к количественной оценке потенциала применения технологии управления спросом. Это позволяет использовать DR PI как инструмент поддержки принятия решений о запуске DSM в автономных ЭТК с гибридной генерацией.

2. Внедрение принципов DSM, основанных на разработанной классификации электроприёмников, обеспечивает повышение эффективности работы автономного ЭТК с гибридной генерацией.

Для автономного ЭТК с гибридной генерацией реализация DSM невозможна как единое универсальное воздействие DR на все электроприёмники ввиду индивидуального характера потребления каждой нагрузки. Поэтому для перехода от общей идеи DSM к реализуемому алгоритму в работе была разработана классификация электроприёмников для целей управления спросом на ЭЭ.

В работе выделены пять классов нагрузок: вариативная, скользящая, гибкая, мигрирующая и пассивная. Эти классы включают нагрузки, различающиеся по характеру технологического цикла, допустимости изменения мощности, возможности временного переноса, двунаправленного перетока мощности и пространственной привязке к центру питания.

Суть классификации состоит в том, что каждому классу нагрузки соответствует собственный механизм DSM. Для вариативной нагрузки управление реализуется через ограничение или модуляцию мощности, для скользящей – через перенос непрерывного цикла, для гибкой – через двунаправленное регулирование мощности, для мигрирующей – через пространственно-временное перераспределение нагрузки между центрами питания, пассивная нагрузка исключается из множества управляемых.

Для каждого класса разработана собственная математическая модель управления. Для вариативной нагрузки введена задача перераспределения части мощности в пределах окна $W_{DR}(t)$ при сохранении энергетического баланса; для скользящей – задача выбора нового момента запуска непрерывного цикла нагрузки; для гибкой – задача двунаправленного регулирования мощности с учётом ограничений по SoC; для мигрирующей – задача выбора центра питания. Тем самым разработанная классификация доведена до уровня формализованных алгоритмов DSM.

Для оценки эффекта от внедрения DSM в работе сформирована внешняя задача оптимизации, в которой параметры управления различными классами нагрузок объединены в вектор Θ . Для каждого значения Θ формируются скорректированные графики нагрузки, которые затем передаются в расчётное ядро Matpower/MOST. Таким образом, в работе оптимизируется не только режим генерации, но и сами

параметры DSM, определяемые на основе классификации электроприёмников.

Эффект внедрения DSM оценивался по целевой функции, включающей экономическую компоненту через операционные затраты, технологические компоненты через число пусков и режим работы дизельных генераторов, а также экологическую компоненту через минимизацию ограничения генерации ВИЭ. Следовательно, эффект достигается системно: по трём группам показателей.

Для проверки положения сформирована расчётная модель автономного ЭТК промышленного предприятия с радиально-лучевой топологией, четырьмя ДГУ, солнечной и ветровой генерацией (рисунки 8-11). Составлены три сценария моделирования: базовая эксплуатация, внедрение систем накопления ЭЭ и внедрение DSM на основе разработанной классификации нагрузок. Порядок моделирования показан на рисунке 12.

Расчётная модель была верифицирована с опорой на результаты расчёта базового сценария. Верификация произведена путём сравнения режимных параметров между моделью и действующим предприятием. Проверка пройдена по напряжению в узлах, перетокам в ветвях, составу генерации.

Экономический эффект подтверждён результатами моделирования: внедрение DSM с учётом предложенной классификации нагрузок обеспечило снижение операционных затрат на 21,5 % по сравнению с базовым сценарием. По финансовым показателям предложенный подход ко внедрению DSM также оказался более эффективным по сравнению с внедрением систем накопления ЭЭ (рисунок 13).

Технологический эффект проявляется в улучшении режимов работы дизельной генерации. По результатам моделирования установлено снижение числа кратковременных пусков дизельгенераторной установки (ДГУ), уменьшение

величины набросов и сбросов мощности, исключение работы на малой нагрузке и рост коэффициента использования установленной мощности ВИЭ. Это означает, что DSM, основанный на классификации нагрузок, повышает не только экономическую, но и эксплуатационную эффективность автономного ЭТК с гибридной генерацией (рисунок 14).

Экологический эффект оценён по объёму прямых выбросов Score 1. Показано, что внедрение DSM обеспечивает снижение прямых выбросов на 5,1 % по сравнению с базовым режимом и является более эффективным, чем сценарий внедрения систем накопления ЭЭ.

Следовательно, полученный эффект обусловлен применением разных типов управляющих воздействий к различным классам электроприёмников в соответствии с их физико-технологическими ограничениями.

Таким образом, управление спросом на ЭЭ на основе разработанной классификации электроприёмников реализуемо в автономном ЭТК с гибридной генерацией, и оно обеспечивает одновременное улучшение экономических, технологических и экологических показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки в области решения задачи повышения эффективности работы автономных ЭТК с гибридной генерацией путём управления спросом на ЭЭ, имеющие существенное значение для развития страны.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Выявлены научно-технические проблемы повышения эффективности работы автономных электротехнических комплексов с гибридной генерацией. Показано, что в таких системах повышение эффективности определяется не только

снижением расхода топлива и операционных затрат, но и требованиями к надёжности электроснабжения, устойчивости режима, допустимости работы дизельной генерации в рекомендуемых диапазонах загрузки, а также необходимостью более полного использования энергии ВИЭ в условиях изолированности и ограниченного резерва мощности.

2. Выполнен анализ существующих методов оценки возможности и потенциала применения технологии управления спросом в автономных ЭТК с гибридной генерацией, а также существующих подходов к классификации электрических нагрузок. Установлено, что известные показатели определения потенциала DSM и классификации нагрузок для целей управления спросом, как правило, либо не учитывают специфику автономных ЭТК, либо не обеспечивают перехода к формализованному описанию технологических ограничений конкретных электроприёмников и выбору допустимого типа управляющего воздействия.

3. Разработан метод выявления индивидуальных особенностей графика нагрузки потребителя, основанный на схеме «сегментация временного ряда-сингулярный спектральный анализ-кластеризация компонент». Показано, что переход от прямой кластеризации профилей к кластеризации компонент разложения позволяет устойчиво выделять характерные паттерны электропотребления и использовать их как основу для последующей оценки потенциала применения DSM.

4. Обоснован критерий оценки потенциала внедрения технологии управления спросом в автономных ЭТК с гибридной генерацией в виде интегрального индекса DR PI. Показано, что индекс, включающий компоненты объёма потенциально гибкой энергии, её концентрации во времени и динамики внутрисуточных изменений, позволяет количественно оценивать актуальность и потенциал нагрузки к

управлению спросом и сохраняет устойчивость практических выводов в результате расчётов при вариации весовых коэффициентов.

5. Обоснована классификация электрических нагрузок, ориентированная на цели DSM, и показано, что она может быть использована как основа для последующей формализации подходов к управлению спросом. Введены классы вариативной, скользящей, гибкой, мигрирующей и пассивной нагрузки, для которых сформулированы допустимые типы управляющего воздействия и соответствующие ограничения, что позволило перейти к математическому описанию алгоритмов DSM для различных групп электроприёмников.

6. Оценены технико-экономические показатели применения разработанного алгоритма управления спросом на электроэнергию на основе предложенной классификации нагрузок. По результатам моделирования автономного ЭТК промышленного предприятия установлено, что внедрение DSM снижает операционные затраты с 795 288 до 622 858 руб./сутки, то есть на 21,5 %, обеспечивает более высокую экономическую эффективность по сравнению со сценарием внедрения СНЭЭ, а также приводит к снижению прямых выбросов Score 1 с 5 207 до 4 943 т $\text{CO}_2/\text{год}$, уменьшению числа кратковременных пусков дизельных агрегатов, исключению их работы на малой нагрузке и повышению коэффициента использования установленной мощности ВИЭ.

Перспективы дальнейшего развития темы диссертационного исследования связаны с интеграцией передовых методов машинного обучения для предиктивной аналитики и динамической адаптации индекса потенциала управления спросом в режиме реального времени. Логичным продолжением работы также является комплексная оценка долгосрочного влияния разработанных алгоритмов DSM на надёжность и ресурс элек-

тротехнического оборудования автономных ЭТК, а также расширение предложенной классификации электроприемников за счёт интеграции зарядной инфраструктуры электротранспорта (технологии V2G/V2X). Кроме того, значительный практический и научный потенциал имеет переход к децентрализованным локальным рынкам гибкости и программно-аппаратная реализация созданных математических моделей на базе цифровых двойников и технологий полунатурного моделирования (Hardware-in-the-Loop) для последующего внедрения алгоритмов в промышленные контроллеры управления микросетями.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Жуковский, Ю.Л. Многомерная классификация нагрузки с учетом целей управления спросом на электроэнергию / Ю.Л. Жуковский, **П.К. Сусликов** // Энергия единой сети. – 2024. – № 3-4(74). – С. 30-38.

2. Жуковский, Ю.Л. Повышение энергоэффективности автономных электротехнических комплексов на основе классификации нагрузок и алгоритмов DSM / Ю.Л. Жуковский, **П.К. Сусликов**, П.В. Яковлев // Промышленная энергетика. – 2026. – № 1. – С. 31-40.

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

3. Жуковский, Ю.Л. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях / Ю.Л. Жуковский, **П.К. Сусликов** // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16, № 3(61). – С. 895-908. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908

4. Жуковский, Ю.Л. Идентификация и классификация электрической нагрузки горных предприятий на основе методов декомпозиции сигналов / Ю.Л. Жуковский,

П.К. Сусликов // Записки Горного института. - 2025. - Т. 275. - С. 5-17. EDN HPZAGK

5. Zhukovskiy, Y.L. NILM-Based Feedback for Demand Response: A Reproducible Binary State-Detection Algorithm Using Active Power / Y.L. Zhukovskiy, **П.К. Suslikov**, D.L. Rasputin // Electricity. – 2026. – Vol. 7 (1), No. 23. – DOI: 10.3390/electricity7010023.

Публикации в прочих изданиях:

6. **Сусликов, П.К.** Определение скрытых зависимостей множественных временных рядов потребления электроэнергии с целью классификации и управления профилями нагрузки / **П.К. Сусликов**, Ю.Л. Жуковский // Электроэнергетика глазами молодёжи-2024 : Материалы XIV Международной научно-технической конференции. В 2-х томах, Ставрополь, 01-04 октября 2024 года. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2024. – С. 127-130.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662691 Российская Федерация. Программа для выявления периодических паттернов во временных рядах потребления электроэнергии. Заявка № 2025661470: заявл. 12.05.2025 : опубл. 22.05.2025 / Ю.Л. Жуковский, **П.К. Сусликов**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 57 КБ.

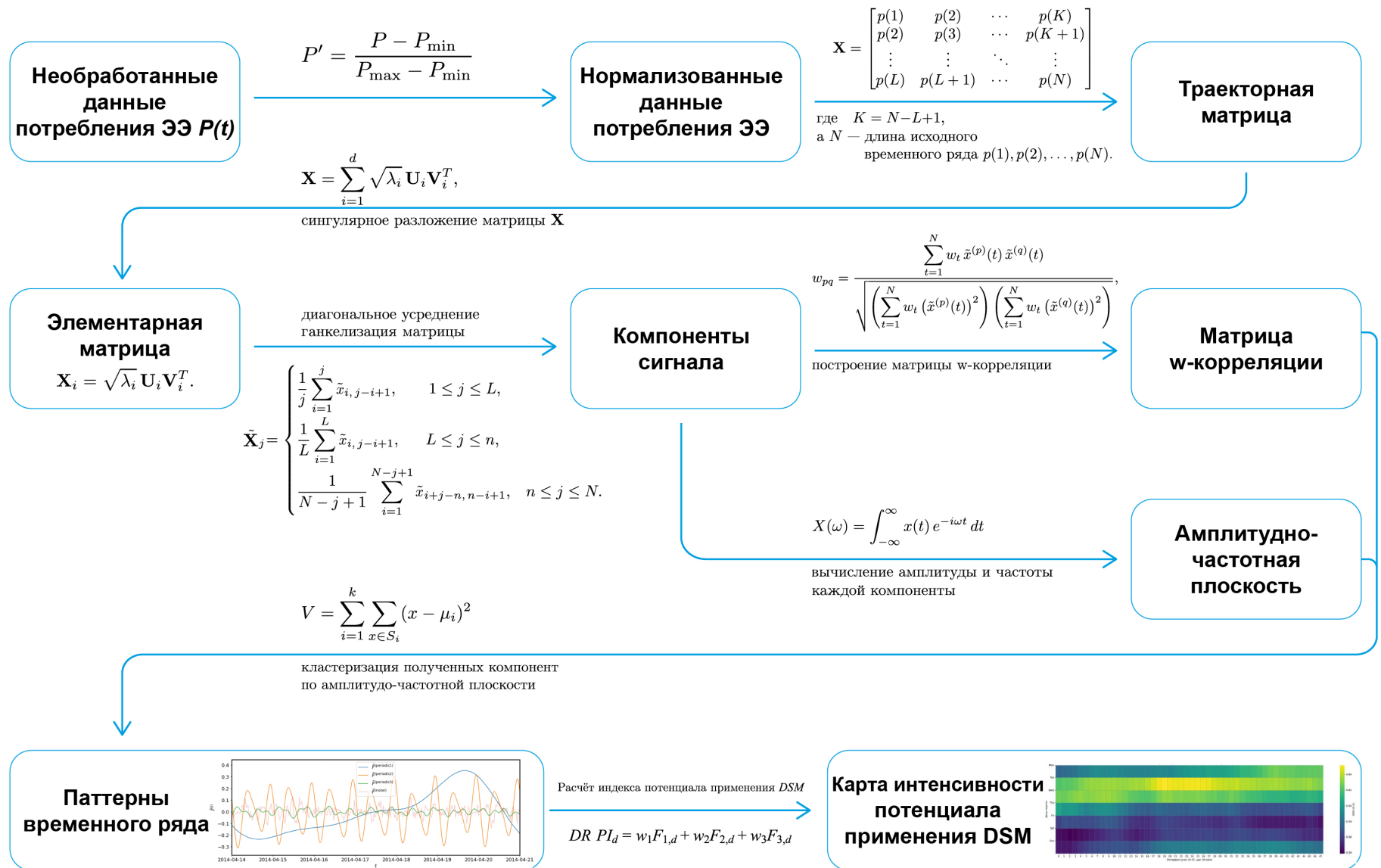


Рисунок 1 – Алгоритм получения паттернов потребления ЭЭ с дальнейшим формированием тепловой карты внедрения DSM

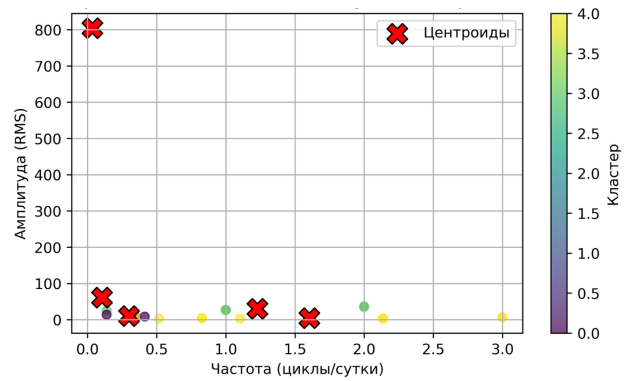


Рисунок 2 – Амплитудно-частотное представление для первых 30 компонент временного ряда

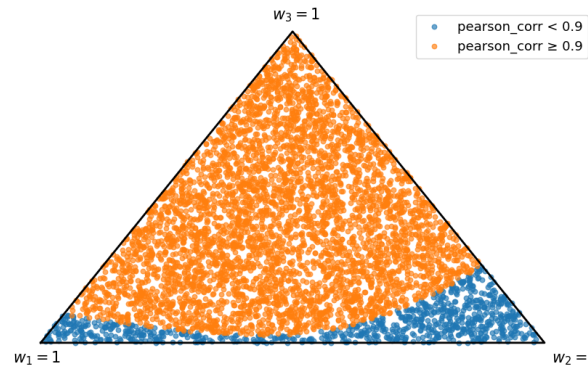


Рисунок 6 – Область устойчивости DR FI при пороге $P \geq 0,9$

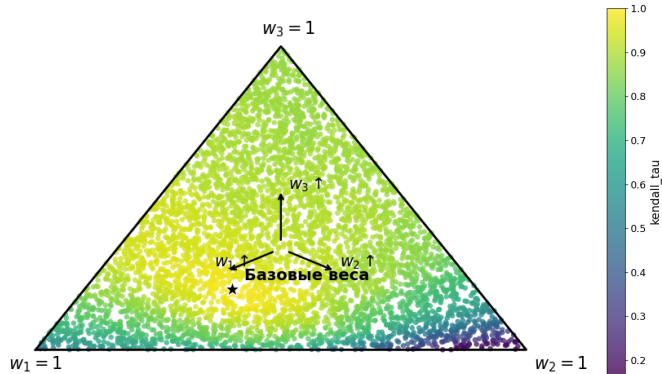


Рисунок 7 – Распределение коэффициента Kendall τ на симплексе весовых коэффициентов DR FI

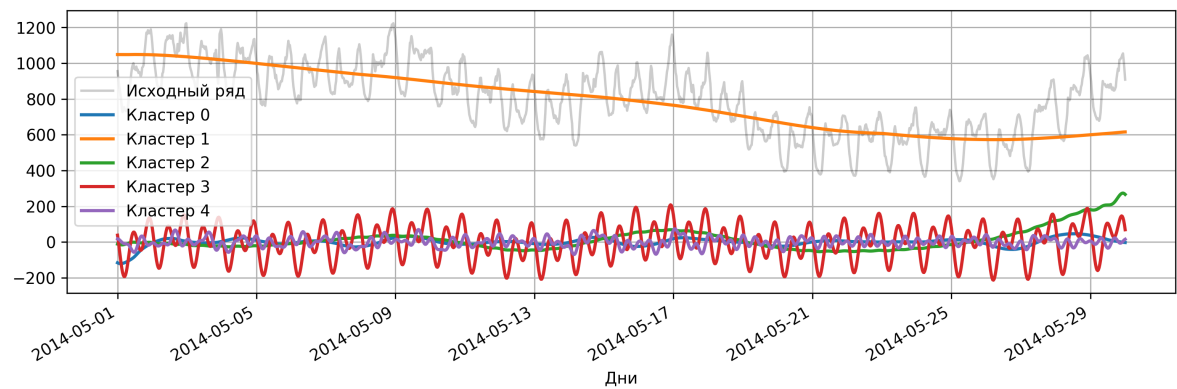


Рисунок 3 – Временные ряды потребления ЭЭ (паттерны потребления ЭЭ), полученные в результате суммирования компонент первых пяти кластеров

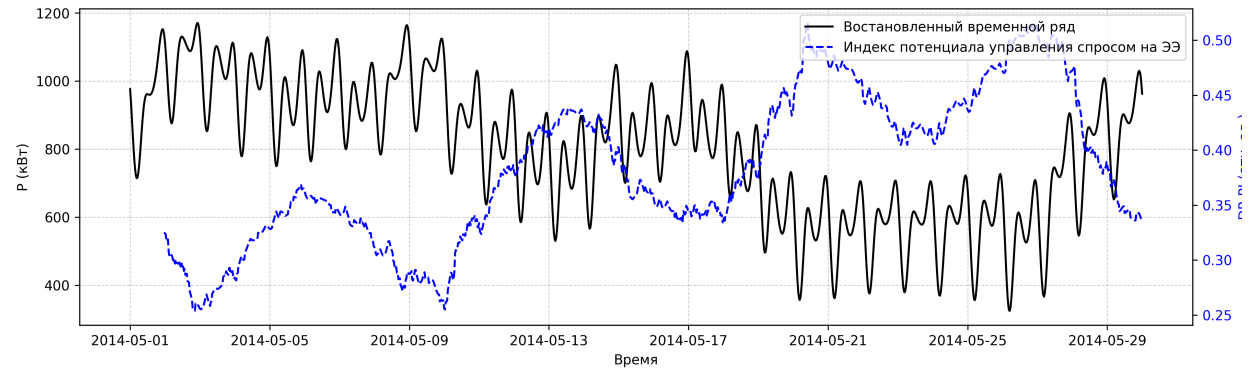


Рисунок 4 – Индекс потенциала управления спросом DR PI как временной ряд

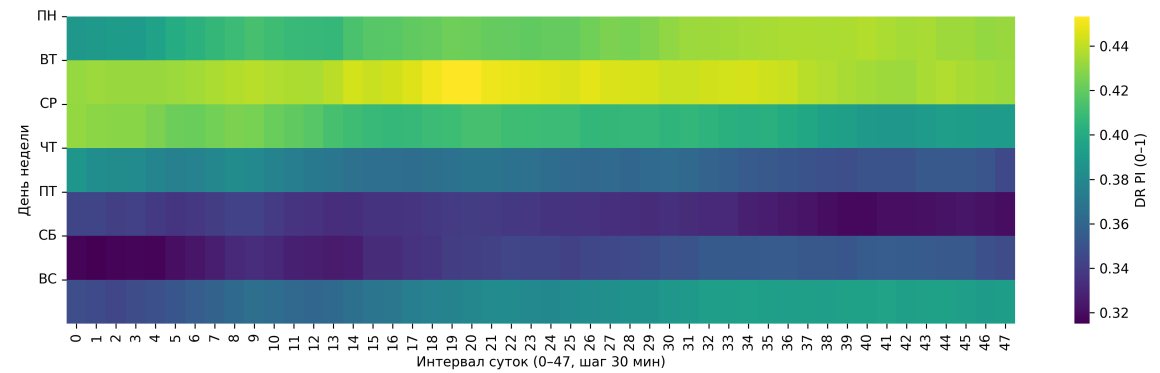


Рисунок 5 – Тепловая карта предпочтительных временных интервалов для включения DSM

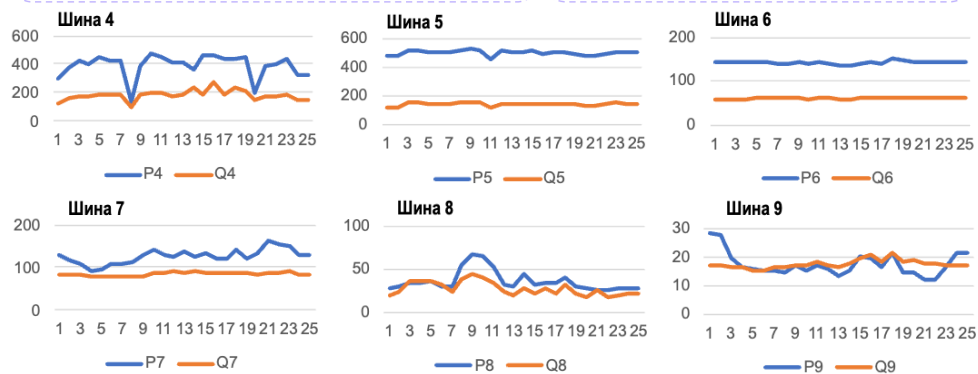
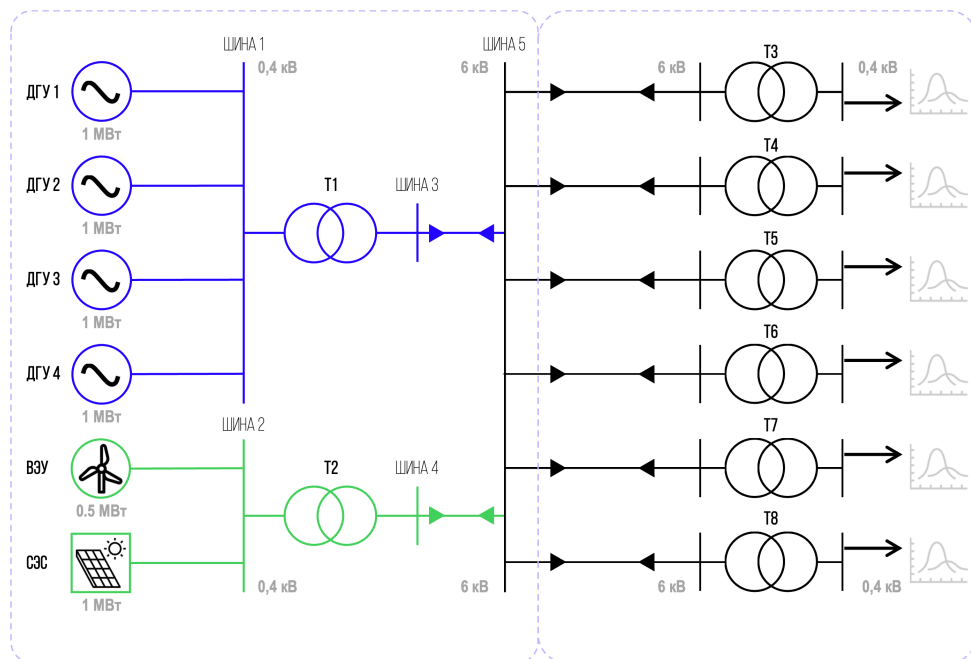


Рисунок 8 – Автономный ЭТК с гибридной генерацией и графики нагрузок по каждому из отходящих присоединений

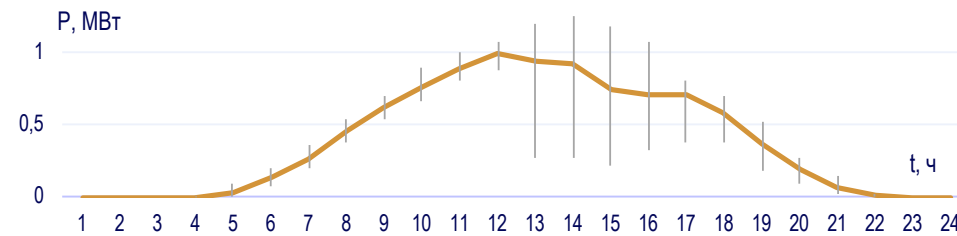


Рисунок 9 – Временной ряд генерации ЭЭ солнечной электростанций

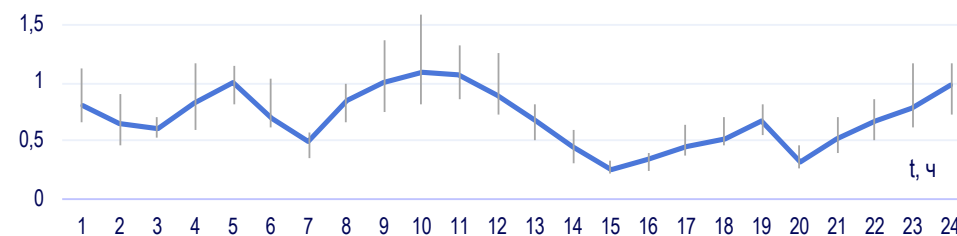


Рисунок 10 – Временной ряд генерации ЭЭ ветроэлектростанций

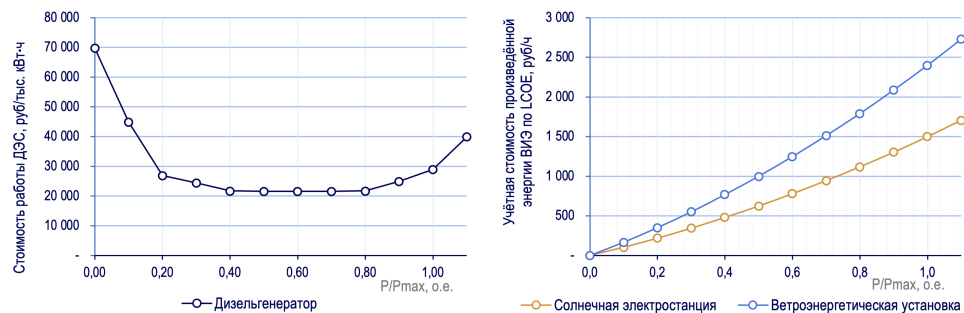


Рисунок 11 – Стоимостные характеристики генерации ДГУ, ВЭС и СЭС

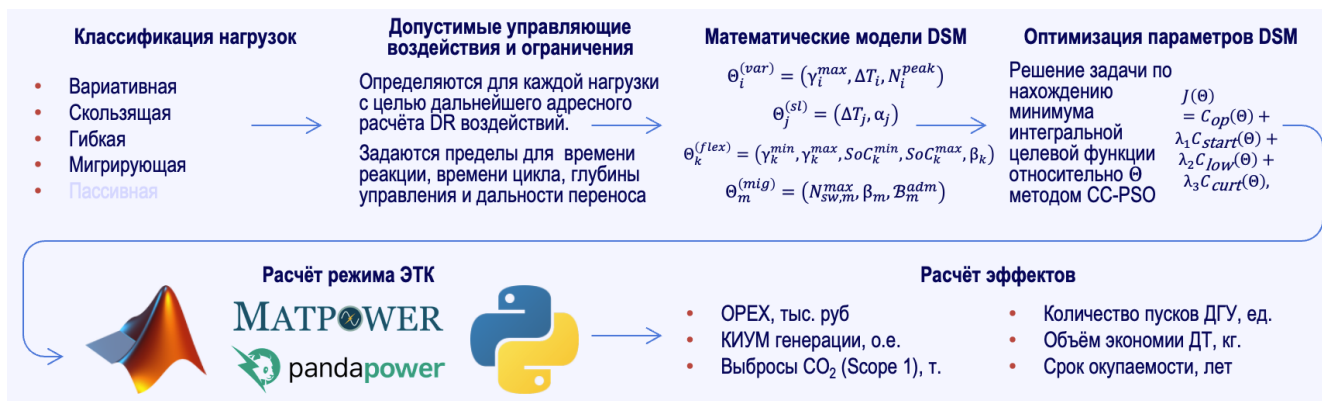


Рисунок 12 – Порядок расчёта эффекта от внедрения DSM с учётом предложенной классификации электрических нагрузок

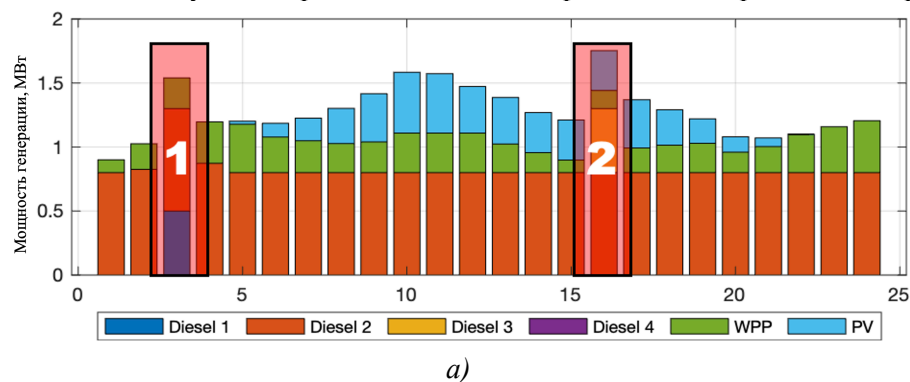
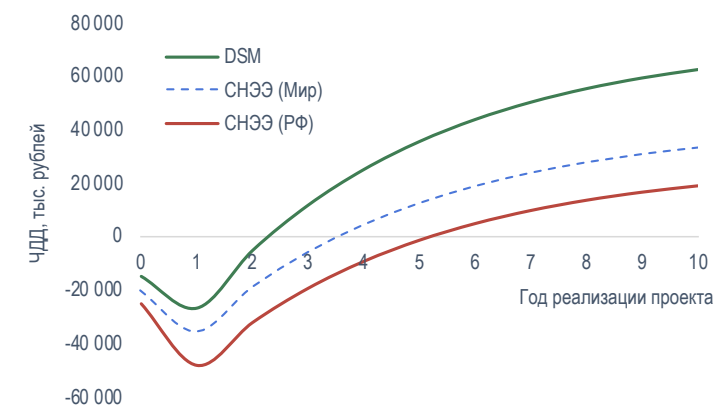
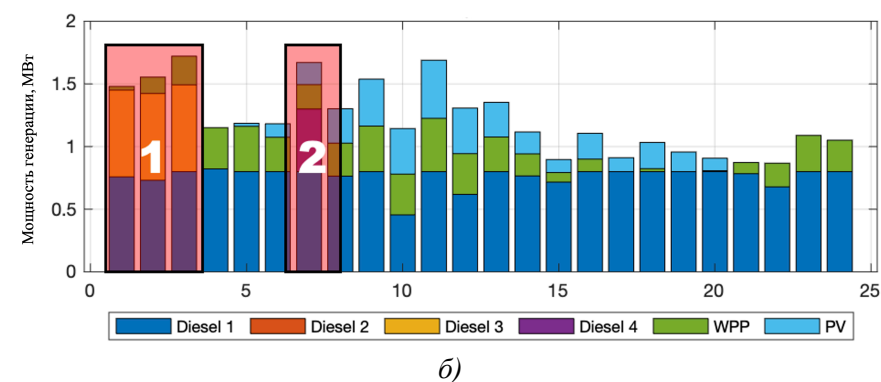


Рисунок 14 – Работа автономного ЭТК в базовом сценарии (а) и при внедрении DSM (б)



Показатель	DSM	CHЭЭ (Мир)	CHЭЭ (РФ)
Внутренняя норма доходности (IRR), %	82,07	39,01	52,64
Чистая приведённая стоимость (NPV), тыс. руб	103 825	19 384	33 561
Индекс рентабельности проекта (PI), о.е.	7,95	1,78	2,68
Срок окупаемости проекта (PP), годы	2,2	3,5	5

Рисунок 13 – Экономические показатели проектов