

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента, доктора технических наук, доцента**

**Сулова Константина Витальевича**

**на диссертационную работу Сусликова Павла Константиновича**

**«Управление спросом на электроэнергию автономных электротехнических комплексов путём идентификации паттернов и классификации нагрузок»  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы**

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения эффективности автономных электротехнических комплексов промышленного назначения с гибридной генерацией посредством управления спросом на электроэнергию. В качестве основы для адресного выбора управляющих воздействий автор использует идентификацию паттернов электропотребления, интегральную оценку потенциала DSM и функциональную классификацию нагрузок.

Работа изложена на 160 страницах, включает введение, четыре главы с выводами, заключение, список сокращений и условных обозначений, библиографический список из 129 наименований и три приложения; содержит 47 рисунков и 9 таблиц. Структура диссертации логична, последовательность решения задач соответствует заявленной цели.

### **Актуальность темы диссертации**

Актуальность исследования определяется спецификой электроснабжения удалённых и изолированных промышленных объектов. Для автономных комплексов характерны высокая топливная составляющая себестоимости электроэнергии, ограниченный вращающийся резерв, необходимость согласования дизельной генерации с вероятностным производством ВИЭ и повышенные требования к надёжности. В этих условиях управление спросом является действенным способом улучшения режимов без обязательного наращивания установленной мощности генерации. Вместе с тем практический

эффект DSM зависит от корректного определения фактически управляемой части нагрузки и согласования воздействий с технологическими ограничениями электроприёмников. Именно этот недостаточно разработанный аспект положен в основу диссертации.

Поставленная цель – повышение эффективности работы автономных электротехнических комплексов с гибридной генерацией путём управления спросом – соответствует современным задачам оптимизации локальных энергосистем, интеграции распределённой генерации и снижения углеродной интенсивности промышленного производства. Сформулированные шесть задач охватывают анализ существующих подходов, разработку метода выделения паттернов, обоснование индекса DR PI и классификации нагрузок, а также технико-экономическую оценку предлагаемого алгоритма. Поэтому актуальность темы и своевременность её разработки не вызывают сомнений.

### **Научная новизна**

К основным результатам, обладающим научной новизной, следует отнести:

1. Установленную возможность устойчивого разделения компонент сингулярного спектрального анализа временного ряда электропотребления на группы паттернов при их представлении на амплитудно-частотной плоскости.

2. Полученную зависимость интегрального индекса потенциала управления спросом DR PI от вклада, амплитуды и периодичности компонент SSA, позволяющую перейти от качественного суждения о гибкости к количественной оценке.

3. Предложенную классификацию электроприёмников по пяти классам – вариативная, скользящая, гибкая, мигрирующая и пассивная нагрузка – ориентированную непосредственно на допустимые способы управления спросом.

4. Способ управления каждым классом нагрузок в составе задачи минимизации операционных затрат автономного электротехнического комплекса с гибридной генерацией.

Совокупность указанных результатов образует завершённую методическую цепочку: от анализа фактического графика нагрузки и выявления его структуры до выбора допустимого управляющего воздействия и оценки режимного и экономического эффекта.

### **Обоснованность и достоверность научных положений**

Обоснованность результатов обеспечивается применением известных методов анализа временных рядов, сингулярного спектрального анализа, кластеризации k-средних, математического моделирования установившихся режимов и оптимизации. Автор не ограничивается качественной интерпретацией: показано, что первые семь компонент восстанавливают около 99,5 % информации исходного ряда; устойчивость группировки оценена с применением индексов ARI и NMI, которые для большинства исследованных окон находятся на уровне 0,55–0,70; влияние случайной инициализации k-средних характеризуется малыми стандартными отклонениями. Устойчивость ранжирования при варьировании весов интегрального индекса подтверждена средним коэффициентом Кендалла 0,84.

Режимная часть исследования выполнена на модели радиального автономного комплекса, включающего четыре дизель-генераторные установки по 1 МВт, солнечную электростанцию мощностью 1 МВт и ветроэлектростанцию мощностью 0,5 МВт. Для разных классов нагрузок введены энергетические, временные и технологические ограничения. В качестве ядра расчёта использованы MATPOWER/MOST, а поиск решения интегрированной задачи выполнен методом кооперативной коэволюционной оптимизации роя частиц. Сопоставление базового и управляемого режимов проведено по экономическим, технологическим и экологическим показателям. Полученные результаты согласуются с физическим смыслом изменения

режима: сокращаются работа ДГУ при малой загрузке и число кратковременных пусков, возрастает использование энергии ВИЭ.

Достоверность выводов дополнительно поддерживается публикацией результатов в шести работах, включая две статьи в изданиях из Перечня ВАК и три статьи в изданиях, индексируемых Scopus, получением свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662691, апробацией на семи научных мероприятиях, в том числе пяти международных, а также актом внедрения в ООО «ГЦЭ – Энерго» от 21.04.2026.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость состоит в развитии методов структурного анализа графиков электропотребления и формализации управляемости нагрузки автономных комплексов. Предложенное амплитудно-частотное описание компонент SSA обеспечивает содержательную связь между временной структурой электропотребления и интегральным показателем DR PI. Классификация по допустимому типу воздействия дополняет традиционное деление нагрузок по отраслевой принадлежности, режиму работы или категории надёжности.

Практическая значимость подтверждается разработанным алгоритмом выявления периодических паттернов и возможностью включения моделей пяти классов нагрузки в контур суточного планирования режима. В расчётном примере применение DSM снизило операционные затраты с 795 288 до 622 858 руб./сутки, то есть на 21,5 %, и прямые выбросы Score 1 с 5 207 до 4 943 т CO<sub>2</sub>/год. Полученные результаты могут быть использованы при создании систем энергоменеджмента и диспетчерского управления автономных промышленных микросетей, при обосновании состава накопителей и при выборе мероприятий по повышению гибкости нагрузки.

### **Оценка содержания, оформления и соответствия специальности**

Во введении корректно сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, научная новизна и защищаемые положения. Первая глава

содержит системный обзор структуры автономных комплексов, методов DSM, оценки гибкости и классификации нагрузки. Во второй главе разработана процедура «сегментация – SSA – кластеризация», сформирован индекс DR PI и исследована его устойчивость. Третья глава посвящена пяти классам нагрузок и математическому описанию допустимых воздействий. В четвёртой главе модели объединены в задаче оптимального планирования режима и выполнена технико-экономическая оценка.

Результаты соответствуют пунктам 1 и 3 паспорта специальности 2.4.2: развивают методы математического, имитационного и компьютерного моделирования электротехнических комплексов, а также методы их структурно-параметрической оптимизации и эффективного управления. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации, основные научные положения, результаты и выводы. Материал изложен в научном стиле, терминология в целом использована последовательно, иллюстрации и таблицы информативны.

### **Замечания и вопросы**

При общей положительной оценке работы необходимо отметить следующие положения, требующие обсуждения:

1. При расчёте компоненты F1 индекс DR PI исходит из предположения, что мощность выше 20-го перцентиля суточного профиля потенциально гибкая. Требуется более подробно обосновать физическую связь этого статистического порога с технологически допустимым объёмом разгрузки конкретного электроприёмника.

2. Интегральный критерий режимной оптимизации включает весовые коэффициенты штрафов за пуски ДГУ, работу при малой загрузке и ограничение ВИЭ. В диссертации недостаточно полно раскрыты выбор численных значений этих коэффициентов и чувствительность оптимального решения к их изменению.

3. Расчётный эксперимент выполнен преимущественно для суточного горизонта. Полезно было бы оценить устойчивость эффекта DSM для сезонных сочетаний нагрузки, солнечной и ветровой генерации, а также при ошибках прогноза и аварийном выбытии одного из источников.

4. Высокие показатели инвестиционной эффективности DSM зависят от исходных цен на дизельное топливо, ставки дисконтирования и оценки капитальных затрат на автоматизацию. Следовало представить сценарный анализ этих параметров и границы экономической целесообразности проекта.

5. Для практического применения алгоритма следует конкретизировать требования к измерительной инфраструктуре, периодичности актуализации прогноза, задержкам каналов связи и взаимодействию с действующей АСУ ТП или EMS автономного комплекса.

6. В работе показано снижение кратковременных пусков ДГУ и устранение режимов малой загрузки, однако не приведена отдельная оценка возможного вторичного пика после восстановления нагрузки. Этот эффект важен при выборе ограничений на скорость и продолжительность переноса потребления.

Отмеченные замечания носят дискуссионный и рекомендательный характер, определяют направления дальнейшего развития исследования и не снижают научной и практической ценности полученных результатов.

## **Заключение**

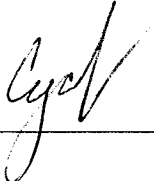
Диссертационная работа является самостоятельным завершённым научно-квалификационным исследованием, в котором содержится решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности автономных электротехнических комплексов с гибридной генерацией, имеющей существенное значение для развития электроэнергетики и промышленности.

Диссертация «Управление спросом на электроэнергию автономных электротехнических комплексов путём идентификации паттернов и классификации нагрузок», представленная на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, соответствует требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор – Сусликов Павел Константинович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

  
\_\_\_\_\_  
28.08.2026 К.В. Суслов  
Подпись \_\_\_\_\_  
удостоверяю \_\_\_\_\_  
начальник управления по \_\_\_\_\_  
работе с персоналом \_\_\_\_\_

Сведения об официальном оппоненте: \_\_\_\_\_ Н.Б. Савин  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования \_\_\_\_\_  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1  
тел.: +7 (495) 362-75-60; e-mail: SuslovKV@mpei.ru; сайт: <https://mpei.ru/>