

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора Герасименко Алексея Алексеевича на диссертационную работу Губина Павла Юрьевича «Планирование ремонтов генерирующего и сетевого оборудования энергосистем с учетом их балансовой надёжности», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика

### **Актуальность темы**

Согласно действующему ведомственному проекту Министерства Энергетики РФ «Единая техническая политика – надёжность электроснабжения» одним из приоритетных направлений повышения надёжности является внедрение рискориентированного подхода к планированию ремонтов и внедрение системы планирования ремонтов оборудования, исходя из его состояния. Отказ от планово-предупредительного подхода, с одной стороны, может привести к снижению затрат и времени простоя оборудования, но при этом повышает неопределенность моментов вывода агрегатов в ремонт и возможного состава оборудования, подлежащего техническому обслуживанию. В этих условиях возрастает риск возникновения дефицита мощности при наложении аварийных, плановых и внеплановых ремонтных работ, особенно заявок с учётом сетевых ограничений. При этом повышается значимость проблемы обеспечения потребителей электроэнергией регламентированного качества. Новые стратегии и условия вызывают развития методов планирования ремонтов с учётом балансовой надёжности электроэнергетических систем (ЭЭС), позволяющих формировать графики плановых отключений как для генерирующего, так и сетевого оборудования. В этой связи диссертационное исследование Губина П.Ю. является научно и практически значимым и безусловно актуально.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Выполнена реализация методов решения задачи планирования ремонтов оборудования энергосистем и сопоставлена их эффективность: показаны достоинства и недостатки каждого из методов.
2. Предложена реализация метода чемпионата в приложении, впервые применяемого к задаче планирования ремонтов генерирующего оборудования.
3. Предложен и протестирован метод аппроксимации дефицита мощности, предназначенный для снижения вычислительных затрат, при расчёте показателей балансовой надёжности энергосистемы за период времени.
4. Получены и подтверждены экспериментально теоретические условия оптимальности графиков ремонта генерирующего оборудования по условиям

минимума расхода топлива, вероятности и математического ожидания дефицита мощности.

5. Предложен алгоритм совместного планирования ремонтов генерирующего и сетевого оборудования по критерию балансовой надёжности энергосистемы с учётом сетевых ограничений для систем со слабыми связями.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа Губина П.Ю соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.3. «Электроэнергетика»:

9. Оптимизация структуры, параметров и схем электрических соединений электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид.

10. Разработка цифровых и физических методов анализа и мониторинга режимных параметров основного оборудования электростанций, электрических сетей и систем электроснабжения.

14. Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы.

18. Разработка методов анализа структурной, балансовой и функциональной надёжности электроэнергетических систем и систем электроснабжения, мини- и микрогрид.

#### **Основные положения, выносимые соискателем на защиту:**

1. Реализация и развитие методов чемпионата, направленного поиска и роя частиц для решения задачи планирования ремонтов по критерию максимальной балансовой надёжности концентрированных ЭЭС.

2. Результаты сравнения оптимальных планов ремонтов, сформированным согласно критериям: минимума суммарных затрат на топливо; минимума интегральной вероятности дефицита мощности; минимума математического ожидания (МО) недоотпуска ЭЭ.

3. Метод аппроксимации функции дефицита мощности на интервалах постоянства состава оборудования при расчёте показателей БН по ММК и в задаче оптимизации плана ремонтов основного оборудования ЭЭС по критерию балансовой надёжности.

4. Методика совместного планирования ремонтов генерирующего и сетевого оборудования системы по критерию БН с учётом сетевых ограничений.

**Теоретическая значимость** работы заключается в аналитической оценке условий оптимальности планов ремонта по различным критериям, развитии

математических методов оптимизации и их реализации в приложении к задаче планирования ремонтов.

**Практическая значимость** работы состоит в предложенном методе планирования ремонтов оборудования энергосистем с учётом сетевых ограничений по критерию балансовой надёжности с помощью метаэвристических методов оптимизации.

**Методология и методы исследования.** При поиске оптимальных решений применялись эвристические и метаэвристические методы оптимизации. Для математического моделирования режимов энергосистем и их оптимизации применялся метод внутренней точки. Все методы и алгоритмы реализованы автором в среде Microsoft Visual Studio Community 2019 на языке программирования C#. Подготовленная программа стала инструментом проведения вычислительных экспериментов для проверки теоретических гипотез, а также эффективности предлагаемых методик. Для анализа данных экспериментов и построения графиков использовались библиотеки языка Python – seaborn и matplotlib.

**Личный вклад** соискателя заключается в анализе действующих и разработанных методов планирования ремонтов; реализации и сопоставлении эффективности ряда метаэвристических подходов в приложении к задаче планирования ремонтов; подтверждении гипотез о распределении относительного резерва мощности при учёте плановых ремонтов в задаче планирования развития энергосистем; разработке и экспериментальной проверке методики планирования ремонтов генерирующего и сетевого оборудования.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 конференциях:

1. 93-е заседание Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики на тему "Надёжность систем энергетики в условиях их цифровой трансформации".

2. IEEE 60th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga, 2019, Riga, Latvia.

3. IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, 2020, Riga, Latvia.

4. IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, 2021, Riga, Latvia.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования соискателя изложены в 7 научных работах, которые полностью отражают основное содержание диссертации, из них 5 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных Аттестационным советом УрФУ и индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus.

## **Степень обоснованности основных положений, выводов и заключений**

Диссертационная работа Губина П.Ю. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка терминов и сокращений, списка литературы, включающего 102 наименования. Общий объем работы составляет 197 страниц печатного текста, включая 10 таблиц и 69 рисунков.

*Во введении* обосновывается актуальность выбранной темы, обозначена степень научной разработанности темы, указаны цели и задачи исследования, дана научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, перечислены положения, выносимые на защиту, описаны методы исследования.

*В первой главе* представлен обзор существующих методов планирования ремонтов по различным критериям. Выделены основные подходы к решению задачи, и в том числе проанализирована действующая в СО ЕЭС методика планирования ремонтов оборудования, основанная на положениях постановления Правительства РФ о выводе объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации.

*Во второй главе* описаны предлагаемые соискателем решения задачи планирования ремонтов с позиции балансовой надёжности в концентрированной системе как задачи многокритериальной, имеющей динамический характер, со сложными внутренними связями, с дискретными и целочисленными переменными, задачи, имеющей ярко выраженные стохастические свойства. Рассмотрено несколько подходов к оценке математического ожидания и вероятности возникновения дефицита мощности. Дана общая постановка задачи и перечислены реализованные и примененные для её решения методы. Показаны условия теоретически оптимальных ремонтных площадок. В ходе вычислительного эксперимента сопоставлены реализованные подходы, подтверждены результаты аналитических рассуждений, выполнена проверка зависимости результатов планирования от неточности исходных данных.

*В третьей главе* дана постановка и описано возможное решение задачи распределения дефицита мощности с учётом сетевых ограничений. Показано, как можно с помощью коэффициентов потокораспределения можно учесть ограничения на перетоки мощности при решении задачи ввода режима в допустимую область. Представлена методика аппроксимации дефицита мощности, позволяющая на порядок снизить вычислительные затраты при расчёте показателей балансовой надёжности за расчетный период времени. Её эффективность подтверждена вычислительными экспериментами по результатам сравнения с расчетами, полученными в промышленном программном комплексе PowerFactory. Экспериментально подтверждены адекватность и приемлемая точность предлагаемых процедур оптимизации.

*В четвёртой главе* описано предлагаемое соискателем решение по совмещенному планированию ремонтов генерирующего и сетевого оборудования с учётом сетевых ограничений. Дана расширенная постановка задачи, ориентированная на планирование ремонтов в системе со слабыми связями. Представлено решение для оценки балансовой надёжности по ограниченному набору наиболее вероятных отказов в системе. Показано, как для этих целей может быть применен механизм выборки по значимости. Описана и проверена в ходе вычислительного эксперимента предлагаемая методика поиска оптимальных графиков ремонта генерирующего и сетевого оборудования. Выполнена проверка справедливости гипотез о теоретически оптимальных площадках ремонта, полученных во второй главе, для случая системы со слабыми связями.

*В заключении* сформулированы основные результаты работы, обозначены перспективы дальнейших исследований.

Отмеченное выше позволяет сделать вывод о достоверности и обоснованности положений диссертации, сделанных выводов и заключений.

**Автореферат** соответствует содержанию диссертации, опубликованные статьи в полной мере отражают основные положения и результаты диссертационного исследования.

#### **Замечания и вопросы по диссертационной работе**

1. Основу диссертационных исследований, методики сбора, обработки и анализа показателей балансовой надёжности (БН) представляет метод статистической выборки, её инструмент – метод статистических испытаний (метод Монте -Карло). Каким объёмом статистических испытаний обеспечена указанная точность и достоверность показателей БН? Что понимается под независимыми испытаниями и являются ли они таковыми при использовании тестовой модели (системы)?

2. Обозначенная диссертантом проблема ремонта оборудования «по состоянию» проработана недостаточно полно. В частности, неясно, как по мнению соискателя скажется переход от планово-предупредительной системы проведения ремонтов к ремонтам по состоянию оборудования на надёжности системы электроснабжения в целом и затратах на проведение ремонтной компании в частности? Какое состояние оборудования может служить для собственника причиной подачи заявки на проведение ремонтов?

3. Судя по выводам автора, наиболее целесообразно ремонтировать основное оборудование ЭЭС в периоды минимальных нагрузок, следовательно план ремонтов слабо влияет на показатели балансовой надёжности. В этой связи, целесообразен ли учёт плана ремонтов при оценке надёжности ЭЭС?

## Заключение

Диссертационная работа Губина П.Ю. «Планирование ремонтов генерирующего и сетевого оборудования энергосистем с учётом их балансовой надёжности» соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. «Электроэнергетика» и вносит вклад в развитие теории балансовой надёжности и совершенствование практики планирования ремонтов. Действующие проекты Министерства Энергетики РФ в области повышения надёжности энергосистем подтверждают актуальность выполненного исследования.

Для диссертации характерна высокая степень обоснованности научных положений, выводов, конкретных рекомендаций по планированию ремонтов основного оборудования ЭЭС. Все полученные результаты проверены в ходе вычислительных экспериментов на базе разработанной программной реализации, а так же в сопоставлении с данными, полученными по существующим промышленным программным комплексам.

Диссертационное исследование «Планирование ремонтов генерирующего и сетевого оборудования энергосистем с учётом их балансовой надёжности» отвечает требованиям Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, а именно пунктам 9, 10, 14 и 18.

Считаю, что автор работы Губин П.Ю. заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

## Официальный оппонент

Доктор технических наук, профессор  
кафедры «Электроэнергетика»,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский федеральный  
университет»

Адрес: 660074, Россия, г. Красноярск  
ул. Академика Киренского, 26.

Тел. (моб. ): +7 960 758 67 99

E-mail: [GerasimenkoAA@yandex.ru](mailto:GerasimenkoAA@yandex.ru)

Подпись А.А. Герасименко заверяю

Герасименко  
Алексей Алексеевич



« 25 » ноября 2022 г.

ФГАОУ ВО СФУ	
Подпись <i>Герасименко</i>	еряю
Делопроизводитель <i>[подпись]</i>	
« 25 » 11	20 22 г.