

На правах рукописи



БОЯРКОВ ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ
СОСТОЯНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Специальность – 2.4.3 «Электроэнергетика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: **Компанеец Борис Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Ившин Игорь Владимирович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», ректорат, проректор по науке и коммерциализации;

Хальясмаа Александра Ильмаровна
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», научная лаборатория цифровых двойников в электроэнергетике, заведующий лабораторией.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Омский государственный технический университет**», г. Омск.

Защита диссертации состоится «15» октября 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» июня 2026 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета,
д-р техн. наук, доцент



Русина Анастасия Георгиевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Повышение надежности электроснабжения потребителей является приоритетным направлением для устойчивого функционирования и развития экономики России, а также улучшения качества жизни населения страны. При этом современное техническое состояние электрических сетей является в целом неудовлетворительным со средним уровнем физического износа более 70 %. Такие сети практически в любой момент могут выйти из строя, тем самым вызывая перерывы электроснабжения со значительным материальным ущербом как потребителям электроэнергии, так и электросетевым организациям. Для поддержания оптимального уровня надежности электрических сетей на практике применяются различные системы по управлению их техническим состоянием, самые распространенные из которых основаны либо на регламентных принципах – планово-предупредительные работы, либо на основе оценки реального технического состояния электрооборудования. При этом обе эти системы в условиях жестких тарифных ограничений являются чрезмерно дорогостоящими и на полную их реализацию у электроэнергетических компаний часто не хватает финансирования. Однако с точки зрения уменьшения эксплуатационных затрат и возможности планирования инвестиций в обновление электросетевой инфраструктуры наиболее технико-экономически эффективной является еще одна система по управлению техническим состоянием электрических сетей, основанная на риск-ориентированном подходе. Данная система направлена на идентификацию электрооборудования, которое находится в наиболее неудовлетворительном техническом состоянии и выход из строя которого приведет к самым тяжелым последствиям. Или, иными словами, такая система технического обслуживания помогает более эффективно выстраивать приоритеты по осуществлению технических воздействий на электрические сети.

В настоящее время на практике применяется относительно небольшое количество риск-ориентированных систем управления техническим состоянием электрических сетей, но они имеют ряд существенных недостатков, которые не позволяют их использовать повсеместно. В связи с этим, в данной научной области существуют следующие неразрешенные проблемы, определенные Министерством энергетики РФ:

- математический аппарат оценки рисков выхода из строя электрических сетей базируется в основном на менее точном и субъективном экспертном методе;
- в процессе обработки информации не используются диагностические данные и статистические показатели об отказах электрооборудования;
- оценка рисков в большинстве случаев осуществляется без определения ущерба от перерыва электроснабжения.

Кроме того, актуальность тематики особо подчеркивается в «Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации», утвержденная Распоряжением Правительства РФ от 3 апреля 2013 г. № 511-р (в ред. от 29.11.2017).

Степень разработанности темы.

Решению проблем, связанных с оценкой и управлением рисками выхода из строя электрических сетей, уделяется большое внимание в научном сообществе. Значительный вклад в развитие теории оценки технического состояния

электрических сетей внесли следующие исследователи: В.М. Левин, И.А. Биргер, В.А. Русов, П.М. Сви, В.В. Клюев, В.П. Вдовико, И.В. Давиденко, С.Е. Кокин, В.А. Буторин. Определенные подходы, касающиеся теории рисков электрических сетей, изложены в трудах как отечественных ученых: А.Н. Назарычева, О.К. Никольского, Н.П. Воробьева, Н.И. Черкасовой, В.В. Гинзбурга, И.Г. Белова, И.О. Волковой, так и зарубежных исследователей: Б. Хампрея, Р. Брауна, Л. Уилса, Д. Стюарта.

Вместе с тем, в данной тематике имеются проблемные места, которые были изложены ранее, и, соответственно, они подлежат дальнейшему разрешению.

Цель работы: повышение обоснованности и эффективности принимаемых решений при формировании инвестиционных и ремонтных программ электросетевых компаний на основе критериев риск-ориентированного управления.

Для разработки принципиально новой риск-ориентированной системы управления техническим состоянием электрических сетей необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести анализ технического состояния электрических сетей, проанализировать основные методы их диагностики и системы по управлению техническим состоянием.

2. Разработать методики оценки вероятностей выхода из строя для отдельных элементов электрической сети и системы электроснабжения в целом с учетом выделения укрупненных групп аварийных режимов.

3. Разработать методику получения, анализа и обработки экспертной информации о внешне идентифицируемых дефектах элементов электрической сети.

4. Разработать методику оценки ущерба от перерыва электроснабжения вследствие выхода из строя элементов электрической сети и системы электроснабжения в целом с учетом времени восстановления конкретного вида электрооборудования и удельного ущерба для различных видов потребителей.

5. Разработать алгоритм поддержки принятия управленческих решений по выбору технических воздействий на элементы электрической сети и систему электроснабжения в целом на основании критериев риск-ориентированного управления.

6. Разработать программный комплекс в целях автоматизированного функционирования риск-ориентированной системы управления техническим состоянием электрических сетей, произвести его апробацию на реальных объектах электросетевого комплекса и осуществить обоснование технико-экономической эффективности внедрения.

Объектом исследований являются электрические сети напряжением до 110 кВ включительно.

Предметом исследований являются процессы развития аварийных режимов в электрических сетях напряжением до 110 кВ включительно, а также их последствия.

Научная новизна.

В диссертационной работе получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. В вероятностные модели выхода из строя элементов электрических сетей введены новые поправочные коэффициенты, учитывающие статистику дефектов и отказов электросетевого оборудования, а также влияние окружающей среды и условий его эксплуатации: постоянная пробоя изоляции $A_{из}$, постоянная выхода из

строю токоведущих частей $A_{конт}$ и постоянная механических повреждений $A_{мех}$.

2. Предложен оригинальный алгоритм поддержки принятия управленческих решений по выбору технических воздействий на элементы электрической сети и систему электроснабжения в целом, на основе разработанных вероятностных моделях, который позволяет определять приоритеты необходимых технических воздействий.

3. Введены новые риск-ориентированные критерии принятия решений при планировании технических воздействий на электрические сети.

Теоретическая значимость состоит в физическом и математическом доказательстве экспоненциальной формы вероятностных моделей выход из строя элементов электрических сетей.

Практическая значимость исследования состоит в следующем:

1. Разработаны методики, позволяющие производить расчет вероятностей выхода из строя элементов электрической сети в зависимости от вида повреждения и на основании периодических аппаратных измерений электрооборудования.

2. Разработана методика оценки ущербов от перерыва электроснабжения вследствие выхода из строя элементов электрической сети и системы электроснабжения в целом с учетом времени восстановления конкретного вида электрооборудования и удельного ущерба для различных видов потребителей.

3. Разработан алгоритм поддержки принятия управленческих решений по выбору технических воздействий на элементы электрической сети и систему электроснабжения в целом, который позволяет за счет сопоставления рисков выхода из строя электрооборудования за межремонтный период и затрат на проведение ремонтных работ, а также расчета показателя эффективности предотвращения ущерба определять приоритеты технических воздействий.

Внедрение результатов работы.

Результаты исследований были внедрены в деятельность следующих компаний: АО «СК Алтайкрайэнерго», ООО «Барнаульская сетевая компания», ООО «Диджитал Бизнес Адаптейшн», что подтверждается соответствующими актами о внедрении. Использование разработанных методик и алгоритмов риск-ориентированной системы управления техническим состоянием электрических сетей позволит снизить операционные издержки электросетевых компаний, повысить точность и эффективность принятия управленческих решений при формировании инвестиционных и ремонтных программ, а также снизить трудоемкость их формирования.

Также результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

На основании разработанных методик и алгоритмов создан программный комплекс для риск-ориентированного управления техническим состоянием электрических сетей «ROSiE» в среде программирования Lazarus 2.0.6 (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665411).

Методы исследования.

В качестве методов исследования использовались: теория вероятностей и математическая статистика, теория надежности технических систем, математический анализ, численный анализ, теория физики проводников и диэлектриков, метод экспертных оценок, теория экономической оценки ущербов в системах

электроснабжения, риск-менеджмент, теория принятия управленческих решений, методы алгоритмизации и программирования, компьютерное моделирование.

Положения, выносимые на защиту:

1. Введение предложенных поправочных коэффициентов, учитывающих статистику дефектов и отказов электросетевого оборудования, влияние окружающей среды и условий его эксплуатации (постоянная пробоя изоляции $A_{из}$, постоянная выхода из строя токоведущих частей $A_{конт}$ и постоянная механических повреждений $A_{мех}$) в модель возникновения аварийных режимов элементов электрической сети, позволяет идентифицировать вид аварийного режима при прогнозировании выхода элемента из строя.

2. Разработанная методика определения вероятности выхода из строя электросетевого оборудования, основанная на преимущественном использовании информации о техническом состоянии оборудования, получаемой в процессе периодических испытаний электросетевого оборудования с применением разработанных вероятностных моделей возникновения аварийных режимов в элементах электрической сети, позволяет получить достоверность методики на уровне 80 %.

3. Предложенные критерии риск-ориентированного управления техническим состоянием электрических сетей ($R_{кан.рем} > Z_{кан.рем}$ и $R_{тек.рем} > Z_{тек.рем}$) в разработанной риск-ориентированной системе управления техническим состоянием оборудования электрических сетей позволяют технико-экономически обосновать управленческие решения о необходимости проведения ремонта электросетевого оборудования, вида ремонта и сроках его проведения.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность результатов подтверждается применением научно обоснованных методов диссертационного исследования, корректным использованием математического аппарата, апробацией основных результатов диссертации на конференциях, а также их практическим внедрением.

Работа основана на анализе практики эксплуатации электрических сетей, результатах проведения периодической диагностики и испытаний оборудования в электросетевых компаниях и обобщении статистической информации по отказам основного электрооборудования. При написании работы для анализа использовались методические указания Министерства энергетики РФ по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа, и опубликованные результаты исследователей по тематике диссертации. Основные результаты исследования согласуются с выводами Минэнерго РФ и с работами других авторов.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: IV International Scientific and Technical Conference “Energy Systems” – ICES-2019 (г. Белгород, 2019 г.); Международная научно-практическая конференция «Электротехнические комплексы и системы» (г. Уфа, 2018 г.); VIII Международная конференция «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (г. Томск, 2019 г.); XI Международная научная конференция «Современный специалист-профессионал: теория и практика» (г. Барнаул 2019 г.); IV Всероссийская научная конференция «Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий» (г. Новосибирск, 2019 г.); Международная научно-практическая конференция «Проблемы управления

финансами в условиях цифровой экономики» (г. Барнаул, 2019 г.); VIII Всероссийская научная конференция «Актуальные вопросы энергетики» (г. Благовещенск, 2019 г.); XIV-XV Международные научно-практические конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (г. Барнаул, 2019 – 2020 г.г.); XIV-XVII Международные научно-практические конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (г. Орел, 2016-2019 г.г.); XV-XVII Всероссийские научно-технические конференции «Наука и молодежь» (г. Барнаул, 2018-2020 г.г.); XX-XXI Научно-практические конференции «Молодежь – Барнаулу» (г. Барнаул, 2019-2020 г.г.); IX Международная научная конференция «Общество. Экономика. Культура: актуальные проблемы, практика решения» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.).

Апробация работы проводилась на объектах электрических сетей с. Кулунда Алтайского края, находящихся в зоне обслуживания АО «СК Алтайкрайэнерго».

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 30 научных работ, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК – 3 статьи, в издании, индексируемом базой данных Scopus – 1 статья, получено одно свидетельство на программу для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в:

– анализе существующих систем управления техническим состоянием электрических сетей, выявлении их основных недостатков, постановке цели работы и задач исследования;

– разработке методик и алгоритма, наполняющих систему управления техническим состоянием электрических сетей: методики оценки вероятности выхода из строя электрических сетей, оценки ущербов от перерыва электроснабжения и алгоритма поддержки принятия управленческих решений по выбору технических воздействий в системах электроснабжения, а также программного комплекса по риск-ориентированному управлению техническим состоянием электрических сетей;

– апробации разработанных методик и алгоритма, наполняющих систему управления техническим состоянием электрических сетей, и основанного на них программного комплекса по автоматизированному управлению техническим состоянием электрических сетей.

Личный вклад соискателя в работах, выполненных в соавторстве, состоит в разработке методик и алгоритмов, а также в представлении результатов исследований для опубликования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Научные результаты диссертации соответствуют специальности: 2.4.3 «Электроэнергетика»: п. 20. Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, анализа, прогнозирования и управления электропотреблением, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы и 4 приложений. Работа изложена на 179 страницах текста, включая приложения, содержит 42 рисунка, 22 таблицы, список литературы включает 150 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполняемых исследований, сформулированы цели и задачи исследования, обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, приведены сведения об апробации основных результатов исследований, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту, личный вклад автора в работу, а также структура диссертации.

В первой главе произведен анализ современного технического состояния, методов диагностики и технического обслуживания электрических сетей, рассмотрены достоинства и недостатки существующих систем управления их техническим состоянием, а также раскрыто понятие риска в электрических сетях и проанализированы методы его оценки.

Для построения риск-ориентированной системы управления техническим состоянием электрических сетей необходимо четко понимать, что вкладывается в такое понятие как «риск». В работе под риском будем понимать двухпараметрическую модель в виде сочетания вероятности P возникновения неблагоприятного события (авария в электрической сети) и стоимости потерь, связанных с этим событием Y (ущерб от перерыва электроснабжения):

$$R = P \times Y \quad (1)$$

Обобщенно разработанную риск-ориентированную систему управления техническим состоянием электрических сетей можно представить как на рисунке 1. Для обеспечения работоспособности данной системы управления необходимо наполнить ее блоки методиками и алгоритмами обработки диагностической, статистической и справочной информации об элементах системы, что и является основной сутью данной работы.



Рисунок 1 – Структурная схема риск-ориентированной системы управления техническим состоянием электрических сетей

Во второй главе произведена разработка методик и алгоритма риск-ориентированной системы управления техническим состоянием электрических сетей, которая состоит из следующих укрупненных блоков.

1. Методика оценки вероятностей выхода из строя электрических сетей.

Как видно из рисунка 1, в первую очередь определяются вероятности возникновения аварийных режимов. Существует большое количество причин, вследствие которых электрические сети могут выходить из строя. Их анализ показал, что укрупненно можно выделить три укрупненных группы аварийных режимов: пробой изоляции, выход из строя токоведущих частей и механические повреждения.

Электросетевые организации с целью идентификации технического состояния оборудования обязаны производить измерения показателей, характерных для рассматриваемого вида электроустановок. Данные параметры измеряются периодически и как раз учитывают все факторы, действующие на электроустановку. Так, например, для изоляции электроустановки таким параметром является сопротивление изоляции $R_{из}$, а для токоведущих частей – сопротивление контактного соединения постоянному току $R_{конт}$. Поэтому построение вероятностных моделей выхода из строя электрических сетей будет производиться на основании именно этих измеряемых величин, что не потребует дополнительных затрат на создание новых подходов к технической диагностике электросетевого оборудования.

В качестве примера получим соответствующую вероятностную модель выхода из строя изоляции электрооборудования, в рамках которой рассматривается вероятность возникновения замыкания на объекте как сумма вероятностей возникновения на его участках.

Рассмотрим электроэнергетический объект, для которого $P_{из}$ – вероятность пробоя изоляции объекта в целом. Выделим участки объекта таким образом, чтобы вероятности возникновения пробоя изоляции на каждом участке были одинаковы и равны $p_{из}$. Тогда вероятность возникновения пробоя изоляции объекта в целом:

$$P_{из} = 1 - (1 - p_{из})^n \quad (2)$$

Рассмотрим вероятность возникновения пробоя изоляции для некоторого участка объекта. Техническое состояние такой изоляции оценивается с помощью следующих показателей: сопротивление изоляции постоянному току $R_{из}$, коэффициент абсорбции $K_{абс}$ и коэффициент поляризации $K_{пол}$. В результате разбиения участка на части можно представить, что общее сопротивление его изоляции ($R_{из}$) будет складываться из сопротивлений изоляции его частей ($r_{из}$), включенных параллельно. В этом случае сопротивление изоляции части объекта:

$$r_{из} = n \cdot R_{из} \rightarrow n = r_{из} / R_{из} \quad (3)$$

Рассмотрим вероятность пробоя изоляции одной такой части. Вероятность возникновения пробоя изоляции части объекта тем меньше, чем сопротивление изоляции выше. Характер такой зависимости оценить очень сложно. Однако любую зависимость можно представить в виде аппроксимирующей полиномом функцией $y = a_0 r_{из}^m + a_1 r_{из}^{m-1} + \dots + a_m r_{из}^0$, бесконечно приближенной к исходному значению.

Следовательно, если не ограничивать степень полинома при аппроксимации произвольной непрерывной функцией, то можно получить результат, приближенный к значению функции в каждой точке. При этом не требуется выбор полинома высокой степени, а наиболее близкий результат проявляется при определении наиболее подходящей степени полинома. Таким образом, вероятность пробоя изоляции будет

обратно пропорциональна сопротивлению рассматриваемой части, выраженной полиномом произвольной степени:

$$P_{uz} \sim \frac{1}{\left(a_0 r_{uz}^m + a_1 r_{uz}^{m-1} + \dots + a_m r_{uz}^0\right)}, \quad (4)$$

где m – степень полинома.

Условия эксплуатации сети, окружающей среды и прочие факторы влияют на формирование вероятностной модели пробоя изоляции и определяют процесс его изменения, а поскольку исследование производится для некоторого фиксированного состояния изоляции, то тогда можно пренебречь изменением данных факторов и представим их влияние в виде постоянной C . Тогда будет справедливо выражение:

$$P_{uz} = \frac{C}{\left(a_0 \cdot \left(\frac{r_{uz}}{K_{abc} \cdot K_{пол}}\right)^m + a_1 \cdot \left(\frac{r_{uz}}{K_{abc} \cdot K_{пол}}\right)^{m-1} + \dots + a_m \cdot \left(\frac{r_{uz}}{K_{abc} \cdot K_{пол}}\right)^0\right)} \quad (5)$$

В этом случае вероятность выхода из строя изоляции будет рассчитываться по формуле:

$$P_{uz} = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{C}{x \cdot r_{uz}^{m-1} \cdot \left(\frac{a_0 \cdot \left(\frac{r_{uz}}{K_{abc} \cdot K_{пол}}\right)^m + a_1 \cdot \left(\frac{r_{uz}}{K_{abc} \cdot K_{пол}}\right)^{m-1} + \dots + a_m \cdot \left(\frac{r_{uz}}{K_{abc} \cdot K_{пол}}\right)^0}{r_{uz}^m}\right)}\right)^{\frac{x}{R_{uz}}}} \quad (6)$$

При увеличении числа разбиений до бесконечности, сопротивление части r_{uz} будет стремиться к бесконечности, следовательно, x также будет стремиться к бесконечности, а величина $\left(1 + \frac{1}{x}\right)^x$, при x , стремящемся к бесконечности, равна

экспоненте « e » (второй замечательный предел). Предел отношения $\frac{a_0 \cdot \left(\frac{r_{uz}}{K_{abc} \cdot K_{пол}}\right)^m + a_1 \cdot \left(\frac{r_{uz}}{K_{abc} \cdot K_{пол}}\right)^{m-1} + \dots + a_m \cdot \left(\frac{r_{uz}}{K_{abc} \cdot K_{пол}}\right)^0}{r_{uz}^m}$ при r_{uz} стремящемся к бесконечности

будет определяться отношением коэффициентов старших степеней полинома и равен $\frac{a_0}{K_{abc} \cdot K_{пол}}$. Заменяем отношение двух констант $\frac{C}{a_0} = A_{uz}$ – постоянная пробоя изоляции.

Величина A_{uz} объединяет в себе совокупность факторов влияния окружающей среды и эксплуатации оборудования на изменение значений сопротивления изоляции и постоянных параметров процесса разрушения изоляции. Данный параметр отличается для каждого вида электрооборудования и может быть определен экспериментально либо на основании накопленной статистики. Для получения безразмерной величины вероятности, постоянная A_{uz} должна иметь единицу

измерения [Ом], и её значения будут изменяться в очень широком диапазоне для различных объектов. Для ухода от этой ситуации перейдем к значению сопротивления относительно к его нормируемой величине: $R_{из} = \frac{R_{из.изм}}{R_{из.норм}}$. Тогда будет справедливо выражение:

$$P_{из} = 1 - \frac{1}{\frac{R_{из.изм}}{R_{из.норм}} \sqrt{e^{A_{из}} \cdot K_{абс} \cdot K_{пол}}} \quad (7)$$

Из выражения (7) выразим значение постоянной пробоя изоляции $A_{из}$:

$$A_{из} = \ln \left(\frac{1}{1 - P_{из}} \right) \cdot \frac{R_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \quad (8)$$

Как уже отмечалось, коэффициент $A_{из}$ для основного электросетевого оборудования можно определить на основании накопленной статистики. Тогда представим величину вероятности пробоя изоляции $P_{из}$ для участка сети в формуле 8 с помощью вероятностно-статистических характеристик:

$$P_{из} = \omega \cdot \alpha_{из}, \quad (9)$$

где ω – параметр потока отказов для рассматриваемого вида электросетевого оборудования; $\alpha_{из}$ – статистический показатель, показывающий долю электрооборудования, которое вышло из строя вследствие пробоя изоляции.

Вероятностная модель выхода из строя токоведущих частей определяется по аналогии с выводом вероятностной модели выхода из строя изоляции элемента сети. Поэтому представим здесь только конечный результат моделирования:

$$P_{конт} = \frac{1}{\frac{R_{конт.изм}}{R_{конт.норм}} \sqrt{e^{A_{конт}}}} \quad (10)$$

где $R_{конт.изм}$ – измеренное в процессе диагностики электрооборудования значение сопротивления контакта; $R_{конт.норм}$ – нормативное значение сопротивления контакта, регламентируемое ПУЭ; $A_{конт}$ – постоянная выхода из строя токоведущих частей.

Приведем вероятностную модель выхода из строя электрооборудования вследствие механических повреждений. Под механическими повреждениями будем понимать видимые нарушения целостности или нормального состояния какого-либо его элемента. Поскольку механические повреждения невозможно представить в виде объективных электротехнических величин, то тогда уместно воспользоваться экспертными оценками. В разработанной шкале качественное описание технического состояния оборудования для выбора оценки основано на дефектных ведомостях, применяемых в электросетевых компаниях. Эксперт четко сличает описание, которое приведено в разработанной шкале, с реальным состоянием оборудования и ставит определенную балльную оценку, соответствующую шкале. При этом оценочная шкала имеет градацию от 1 до 10 баллов, где «1» - наиболее плохое состояние, «10» - наиболее хорошее состояние. При этом минимально выставаемая оценка внешнего состояния равняется «2», поскольку исследуется работоспособное оборудование, которое еще максимально не исчерпало свой ресурс. В качестве примера приведем

критерии и шкалу для экспертной оценки внешних дефектов силового трансформатора (таблица 1).

Таблица 1 – Шкала экспертных оценок внешних дефектов силового трансформатора

<i>Шкала оценки элемента электрической сети</i>	<i>Качественное описание оценки элемента электрической сети</i>
10 «хорошее»	1. Бак трансформатора полностью герметичен; 2. Система охлаждения не имеет внешних дефектов; 3. Уровень масла соответствует норме; 4. Поверхность изоляторов чистая, ровная, без видимых дефектов; 5. Соединение токоведущих элементов не имеют следов коррозии и деформаций; 6. Силикагель в сапуне имеет темно-синий цвет; 7. Шум работы трансформатора соответствует норме; 8. У прочих элементов отсутствуют сколы, трещины, следы коррозии и деформации.
6 «удовлетворительное»	1. Бак трансформатора: наблюдается намокание (отпотевание) масла; 2. Система охлаждения имеет эпизодические загрязнения, но без видимых дефектов; 3. Уровень масла повышен; 4. Поверхность изоляторов имеет незначительные сколы, трещины, изменение окраски части поверхности (хотя бы один признак); 5. В местах соединения токоведущих элементов наблюдаются следы коррозии, незначительные деформации (хотя бы один признак); 6. Силикагель в сапуне имеет светло-синий цвет; 7. Шум работы трансформатора незначительно выше нормы; 8. Прочие элементы имеют незначительные сколы, трещины, следы коррозии, деформации (хотя бы один признак).
2 «неудовлетворительное»	1. Бак трансформатора: наблюдается течь масла; 2. Система охлаждения сильно загрязнена, либо имеются ее деформации (хотя бы один признак); 3. Уровень масла низкий; 4. Поверхность изоляторов имеет значительные сколы, трещины, наблюдаются следы действия электрической дуги (хотя бы один признак); 5. В местах соединения токоведущих элементов наблюдаются почернения, существенные деформации, в соединениях имеется подвижность (хотя бы один признак); 6. Силикагель в сапуне имеет розовый цвет; 7. Шум трансформатора значительно выше нормы; 8. Прочие элементы имеют значительные сколы, трещины, деформации, почернения (хотя бы один признак).

При этом вероятность выхода из строя электрооборудования (ЭО) вследствие механических повреждений определяется по формуле:

$$P_{\text{мех.деф}} = A_{\text{мех.деф}} \cdot \left(1 - \sqrt[10]{\frac{B_{\text{ЭО}}}{10,3}} \right) \quad (11)$$

где $B_{\text{ЭО}}$ – выставаемая экспертная оценка состояния оборудования эксплуатационным персоналом электросетевой организации; $A_{\text{мех.деф}}$ – постоянная механических повреждений, учитывающая статистику дефектов электросетевого

оборудования при возникновении механических повреждений.

Зная вероятность выхода из строя укрупненных групп аварийных режимов, можно определить вероятность выхода из строя всего элемента электрической сети:

$$P = 1 - [1 - P_{из}] \cdot [1 - P_{конт}] \cdot [1 - P_{мех.деф}] \quad (12)$$

Определение вероятности выхода из строя объекта электросетевого хозяйства в целом можно рассмотреть на примере одной из простейших схем соединения электрооборудования подстанции (рисунок 2).

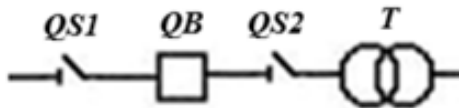


Рисунок 2 – Схема электрических соединений подстанций 3Н

Для такого расположения элементов вероятность выхода из строя подстанции определится по формуле:

$$P = 1 - (1 - P_{QS1}) \cdot (1 - P_{QB}) \cdot (1 - P_{QS2}) \cdot (1 - P_T) \quad (13)$$

где P_{QS1} – вероятность выхода из строя разъединителя № 1; P_{QB} – вероятность выхода из строя силового выключателя; P_{QS2} – вероятность выхода из строя разъединителя № 2; P_T – вероятность выхода из строя трансформатора.

2. *Методика оценки ущерба от перерыва электроснабжения.* В работе предлагается рассматривать только материальные потери, которые понесут электросетевые организации и потребители электроэнергии.

Ущерб электросетевым организациям состоит из двух составляющих:

– затраты на замену поврежденного оборудования Y_3 определяются как сумма затрат на приобретение аналогичного элемента электрической сети $Z_{об}$ и выполнение строительно-монтажных и пуско-наладочных работ по его установке:

$$Y_3 = Z_{об} + Z_{СМР}. \quad (14)$$

– ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям ввиду того, что прекращается ее основная производственная деятельность, который можно определить по формуле:

$$Y_{н.э} = P_{cp} \cdot T_{ф} \cdot C_э, \quad (15)$$

где $T_{ф}$ – фактическое время потребления активной мощности в течение календарного года, ч; $C_э$ – стоимость передачи электроэнергии без учета сбытовой надбавки, руб./кВт·ч; P_{cp} – средняя активная мощность, потребляемая в течение календарного года, кВт.

Тогда общий ущерб электросетевым организациям:

$$Y_{э.о} = Y_{н.э} + Y_3. \quad (16)$$

Ущерб потребителям электроэнергии в рамках работы определяется следующим образом:

$$Y_{н.э} = y_0(T_э) \cdot P_{cp}, \quad (17)$$

где $y_0(T_э)$ – коэффициент удельного ущерба от времени выхода из строя оборудования, руб./кВт·ч; $T_э$ – среднее время восстановления работоспособности элемента электрической сети, ч.

Тогда совокупный ущерб от перерыва электроснабжения будет складываться из ущерба потребителям электроэнергии и ущерба электросетевой организации:

$$Y = Y_{н.э} + Y_{э.о}. \quad (18)$$

3. Алгоритм принятия управленческих решений по выбору технических воздействий на электросетевое оборудование представлен на рисунке 3.

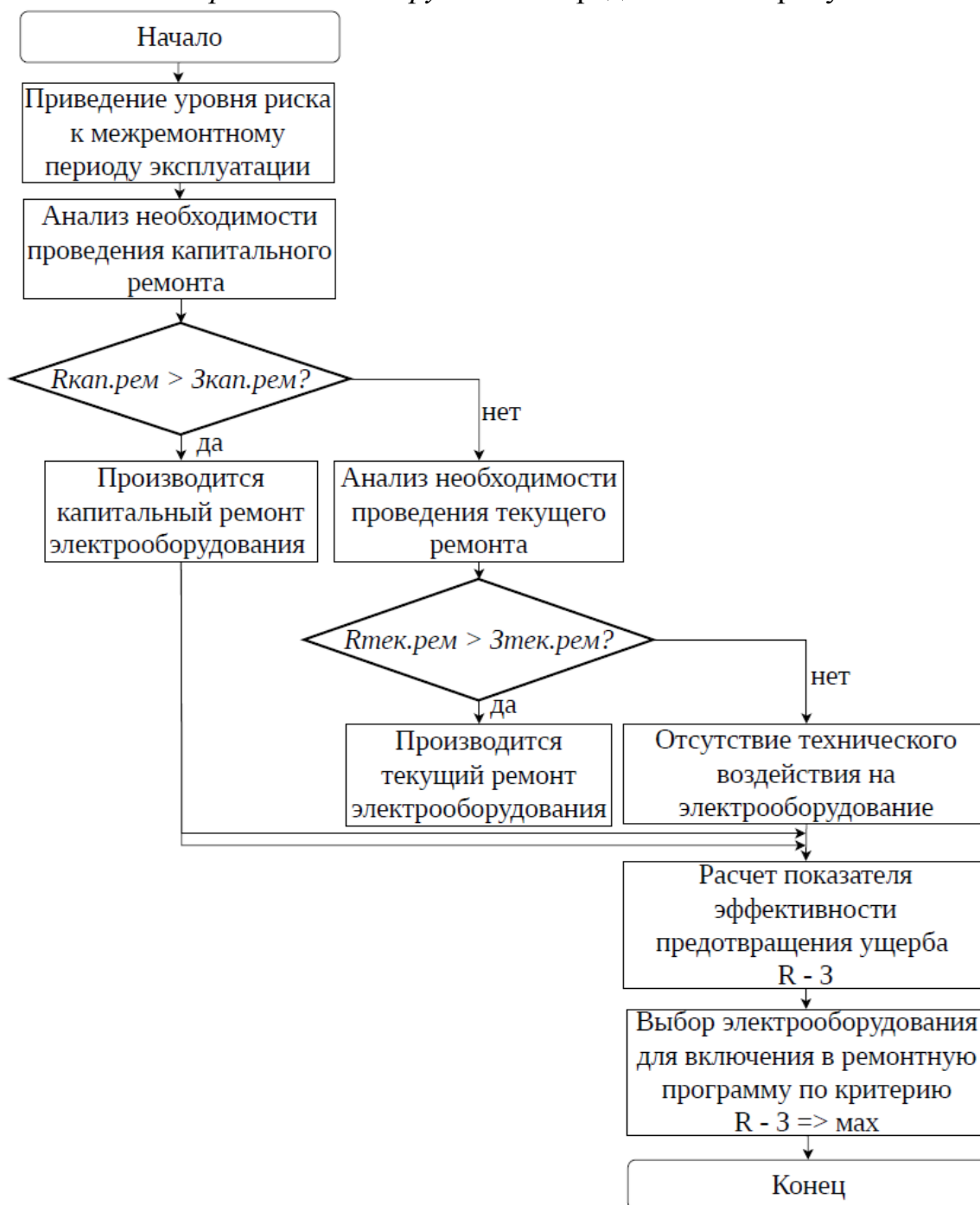


Рисунок 3 – Алгоритм принятия управленческих решений по выбору технических воздействий на электросетевое оборудование

Из данного алгоритма видно, что риск-ориентированное управление техническим состоянием электрических сетей производится на основании сравнения приведенных к межремонтному периоду значений рисков R выхода из строя электрооборудования и затрат на устранение возможной аварии Z .

При этом рассматривается три критерия:

1. Проведение капитального ремонта производится в случае превышения уровня приведенного риска $R_{\text{кап.рем}}$ над затратами на проведение капитального ремонта $Z_{\text{кап.рем}}$:

$$R_{\text{кап.рем}} > Z_{\text{кап.рем}} \quad (19)$$

2. Если первый критерий не выполняется, то проведение текущего ремонта производится в случае превышения уровня приведенного риска $R_{тек.рем}$ над затратами на проведение капитального ремонта $Z_{тек.рем}$:

$$R_{тек.рем} > Z_{тек.рем} \quad (20)$$

Если и данный критерий не выполняется, то техническое воздействие на электрооборудование не требуется.

Выбор конкретного электрооборудования для включения в ремонтную программу в первую очередь происходит на основании показателя эффективности предотвращения ущерба $R - Z$, и происходит включение в ремонтную программу того электрооборудования, которое имеет наибольшее значение данного показателя:

$$R - Z \rightarrow \max \quad (21)$$

В третьей главе на основании разработанных методик и алгоритма риск-ориентированного управления техническим состоянием электрических сетей, для обеспечения автоматизированной оценки рисков выхода из строя электрооборудования был разработан программный комплекс ROSiE (рисунок 4).

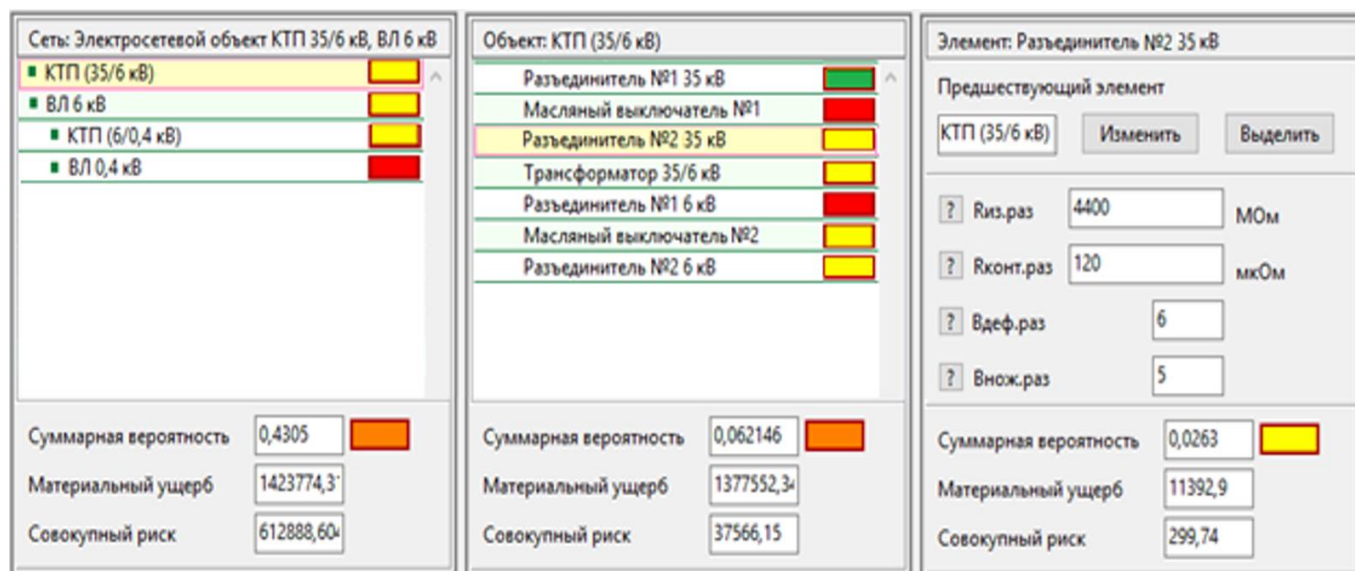


Рисунок 4 – Интерфейс программного комплекса ROSiE

Возможности практического применения разработанной системы и программного комплекса рассмотрим на примере объектов электрических сетей, находящихся на балансе АО «СК Алтайкрайэнерго». Для сравнения уровня рисков и принятия решений по приоритизации технического воздействия на электросетевое оборудование было выбрано два объекта электросетевого хозяйства, таких как «Понижительная ТП 6/0,4 кВ – Воздушная ЛЭП 0,4 кВ»: а) КТП-18 и отходящие от нее ВЛ-0,4; б) КТП-497 и отходящие от нее ВЛ-0,4. В целях принятия решений о приоритете технических воздействий на электрооборудование понижительных подстанций КТП-18 и КТП-497 и отходящих от них линий ВЛ-0,4 составляется сводная таблица 2.

Проанализировав получившиеся расчеты, можно заключить, что наиболее целесообразно произвести текущий ремонт трансформатора на КТП-18, текущий ремонт разъединителя № 1 на КТП-18, а также капитальный ремонт ВЛ-0,4 отходящей от КТП-18. Также в целях комплексного обновления объектов электросетевого хозяйства наиболее целесообразно выполнить текущий ремонт

КТП-18 в целом. Аналогично для группы объектов электросетевого хозяйства типа «Подстанция – ВЛ»: наиболее оптимально произвести мероприятия по капитальному ремонту для группы объектов КТП-18 – ВЛ-0,4.

Таблица 2 – Сводная информация по принятию управленческих решений о приоритете технических воздействий на электросетевое оборудование

Элемент сети	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>R_{кр}</i>	<i>З_{кр}</i>	<i>R_{тп}</i>	<i>З_{тп}</i>	Выбор типа технического воздействия	Показатель эффективности R / З	Выбор приоритета технического воздействия
Трансформаторы									
Трансформатор КТП-18	0,013	17882	144876	239000	53645	6931	текущий ремонт	7,740	v
Трансформатор КТП-497	0,004	5822	47173	309000	17467	8961	текущий ремонт	1,949	
Разъединители									
Разъединитель №1 КТП-18	0,026	1078	3850	40256	1078	1006	текущий ремонт	1,071	v
Разъединитель №2 КТП-18	0,024	989	3531	40256	989	1006	отсутствие воздействия	-	
Разъединитель №1 КТП-497	0,012	503	1796	40256	503	1006	отсутствие воздействия	-	
Разъединитель №2 КТП-497	0,015	608	2170	40256	608	1006	отсутствие воздействия	-	
Воздушные линии									
ВЛ-0,4 от КТП-18	0,393	127302	633966	323950	381907	5183	капитальный ремонт	1,957	
ВЛ-0,4 от КТП-497	0,159	51442	256181	323950	154326	5183	текущий ремонт	29,774	v
Электрооборудование КТП в целом									
КТП-18	0,062	19948	152258	319513	55711	8944	текущий ремонт	6,229	v
КТП-497	0,031	6933	51140	389513	18578	10974	текущий ремонт	1,693	
Объект электросетевого хозяйства КТП – ВЛ-0,4									
КТП-18-ВЛ-0,4	0,431	147250	786224	643463	437618	14127	капитальный ремонт	1,222	
КТП-497-ВЛ-0,4	0,184	58375	307321	713463	172904	16157	текущий ремонт	10,701	v

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных научных исследований получены новые теоретические и практические результаты, направленные на повышение обоснованности и эффективности принимаемых решений при формировании инвестиционных и ремонтных программ электросетевых компаний.

1. Получены зависимости вероятности пробоя изоляции и нарушения контактных соединений от сопротивления изоляции и сопротивления контакта соответственно, что дает возможность определять вероятности выхода из строя электрооборудования на основании периодически измеряемых параметров, а также позволяет использовать существующие системы технической диагностики электрооборудования, что экономически выгодно.

2. Разработаны методики оценки вероятностей выхода из строя отдельных элементов электрической сети и системы электроснабжения в целом, которые основаны на полученных зависимостях вероятности пробоя изоляции и нарушения контактных соединений от сопротивления изоляции и сопротивления контакта. Данные методики позволяют достичь достоверности выходных данных разработанной системы управления техническим состоянием электрических сетей на уровне 80 %, что на 19 % выше уже существующих методик. Такая достоверность обеспечивается благодаря представлению ресурса электрооборудования в виде контролируемых параметров: сопротивления изоляции и токоведущих частей, а также наличию поправочных коэффициентов A , учитывающих статистику дефектов и отказов электросетевого оборудования, а также влияние окружающей среды и условий его эксплуатации. Учитывая такую достоверность методики, можно говорить, что она адекватно описывает явления и процессы, протекающие в электрических сетях.

3. Разработана методика оценки ущербов от перерыва электроснабжения с учетом времени восстановления конкретного вида электрооборудования и возникающего ущерба у различных видов потребителей, что позволяет более корректно рассчитывать риски выхода из строя в целях построения системы управления техническим состоянием электрических сетей.

4. Разработан алгоритм поддержки принятия управленческих решений по выбору технических воздействий на элементы электрической сети и систему электроснабжения в целом, который основан на разработанной методике оценки вероятностей выхода из строя отдельных элементов электрической сети и системы электроснабжения в целом, и позволяющий более обоснованно и эффективно принимать управленческие решения при формировании инвестиционных и ремонтных программ электросетевых компаний.

5. Предложены критерии риск-ориентированного управления техническим состоянием электрических сетей, заключающиеся в сопоставлении рисков выхода из строя электрооборудования за межремонтный период и затрат на проведение ремонтных работ, а также ранжировании электрооборудования по наибольшему значению показателя эффективности предотвращения ущерба. Данные критерии позволяют обеспечить технико-экономическое обоснование принятия управленческих решений в разработанной системе управления техническим состоянием электрических сетей.

6. Спрогнозировано, что за счет применения разработанной риск-ориентированной системы управления техническим состоянием электрических сетей можно за 5 лет уменьшить недоотпуск электроэнергии на 20 %, фонд оплаты труда эксплуатационного персонала на 5 %, а величину складских запасов на 25 %. Так, при внедрении системы в производственный процесс «СК Алтайкрайэнерго» экономический эффект за 5 лет использования составляет 42,8 млн. руб. При этом если рассматривать программный комплекс как инвестиционный проект, то дисконтированный срок окупаемости DPP составляет более 1 года, чистый дисконтированный доход NPV – 4,79 млн. руб., а индекс доходности инвестиций ID равен 5,98.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях из перечня ВАК РФ:

1. **Боярков, Д. А.** Механизм приоритизации обновления электрических сетей с учетом рисков выхода их строя / **Д. А. Боярков, Б. С. Компанец** // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 5. – С. 24-33.

2. **Боярков, Д. А.** Методика оценки технического состояния электрических сетей на основе определения вероятности выхода их из строя / **Д. А. Боярков, Б. С. Компанец** // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – № 5. – С. 31-43.

3. **Боярков, Д. А.** Методика выстраивания приоритетов обновления электросетевого оборудования на основе определения рисков выхода его из строя / **Д. А. Боярков, Б. С. Компанец, В. И. Синицин** // Энергетик. – 2024. – № 11. – С. 22-26.

Публикация в издании, цитируемого в международной базе Scopus:

4. **Boyarikov, D. A.** Electric Grids Technical Evaluation Method based on their Failure Probability / **D. A. Boyarikov, B. S. Kompanets** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 791. – № 1. – С. 012030.

Объект интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020665411 РФ. Определение технического состояния электросетевого оборудования на основании величины риска выхода его из строя: заявл. 10.09.2020; опубл. (зарег.) 26.11.2020 / **Д. А. Боярков, Б. С. Компанец, С. Ф. Нефедов**; заявитель **Д. А. Боярков**. – 1 с.

Публикации в других изданиях:

6. **Боярков, Д. А.** Алгоритм риск-ориентированного управления техническим состоянием электрических сетей / **Д. А. Боярков, А. В. Яценко** // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 56-60.

7. Программный комплекс по оценке и управлению рисками выхода из строя электрических сетей / **Д. А. Боярков, Б. С. Компанец, А. В. Яценко** // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 11. – С. 13-17.

8. Методика экономической оценки ущербов при перерыве электроснабжения в сельской местности / **Ю. В. Герауф, Н. И. Глотова, Д. А. Боярков, О. Е. Доскач** // Международный научный журнал. – 2019. – № 5. – С. 60-66.

9. Обоснование выбора управляющего воздействия при организации технического обслуживания и ремонта электрооборудования / **И. М. Казымов, Б. С. Компанец, Д. А. Боярков, И. И. Михайлов** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 8. – С. 481-486.

10. Подходы к определению величины экономического ущерба и рисков выхода из строя оборудования электроэнергетики / **И. М. Казымов, Д. А. Боярков, Б. С. Компанец** // Век качества. – 2022. – № 3. – С. 150-162.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 2008. Подписано в печать 11.05.2026 г.