

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Энергосбережение и энергоэффективность

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Оценка технического состояния электрооборудования с помощью тепловизионных обследований

Обучающийся

Д.А. Гевель

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, Ю.В. Черненко

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Оценка влияния факторов на показатели надежности электротехнического оборудования.....	5
1.1 Критерии оценки состояния электротехнического оборудования.....	5
1.2 Структура и алгоритм тепловизионной диагностики электротехнического оборудования.....	9
1.3 Проведение оценки влияния факторов на показатели надежности электротехнического оборудования методом ранговой корреляции.....	20
1.4 Проведение проверки соответствия статистических теорий критерию Пирсона.....	26
2 Исследование типового алгоритма тепловизионного обследования электрооборудования.....	33
2.1 Анализ организации системы тепловизионной диагностики электротехнического оборудования при техническом обслуживании.....	33
2.2 Анализ систем прогнозирования состояния электротехнического оборудования с целью определения его остаточного ресурса.....	38
3 Расчет экономической эффективности оценки технического состояния электрооборудования с помощью тепловизионных обследований.....	48
3.1 Понятие экономической эффективности инвестиций в мероприятия по оценке состояния электротехнического оборудования.....	48
3.2 Методика проведения планово-предупредительных ремонтов по состоянию электрооборудования.....	55
3.3 Расчет экономической эффективности оценки технического состояния электрооборудования с помощью тепловизионных обследований.....	57
Заключение.....	64
Список используемых источников.....	69

Введение

Тепловизионная диагностика электрооборудования как один из методов неразрушающего контроля обеспечивает получение экономических эффектов, выражающихся как сумма технических, ресурсосберегающих и организационно-социальных эффектов.

Каждая авария, случившаяся на электрооборудовании, это не только остановка технологического процесса на предприятии, погасшие окна домов в жилых кварталах, но и многомиллионные убытки.

В последние десятилетия большое распространение получают методы контроля параметров электрооборудования под рабочим напряжением. Значительная часть энергетического оборудования системы генерации и распределения электроэнергии нуждается в реконструкции и замене, но несмотря на вышеизложенное продолжается его эксплуатация, так как на его замену или модернизацию требуются колоссальные вложения. В связи с этим затраты на проведение комплексного диагностирования с каждым годом возрастают. Принятие решений о сроках и объемах предупредительных ремонтов по фактическому состоянию силового электрооборудования на основании диагностических измерений является очень сложной и ответственной задачей.

В наборе имеющихся в энергетике и зарекомендовавших себя диагностических методов [7,13,14,17] и средств имеется эффективный метод контроля практически всех видов оборудования – тепловизионный контроль. Комплексный подход в реализации этого вида обследования на электротехническом оборудовании делает его одним из наиболее эффективных видов диагностики, раннего распознавания дефектов.

Возможностью предупредить аварию и выход из строя дорогостоящего оборудования является своевременное диагностирование для выявления дефекта на ранней стадии. Для выполнения задач по тепловизионному контролю используется прибор – термограф (тепловизор).

Как показывает опыт, раннее выявление отклонений, состояния энергетического оборудования, приводит к существенному снижению затрат, на его восстановление и ремонт, а также позволяет предотвратить ущерб от вероятных аварий и отказов.

Не редки случаи превышения потока повреждений оборудования над средними показателями на объектах аналогах. В этой ситуации необходимо провести оценку основных причин и факторов (производственные или климатические), а также запланировать сроки проведения дополнительных тепловизионных обследований.

Оценивая техническое состояние электрооборудования с помощью тепловизионных обследований с учетом влияния производственных и климатических факторов на показатели его надежности и на тенденции их изменения, можно сформулировать задачи магистерской диссертации:

- первая задача: оценка различных факторов на показатели надежности;
- вторая задача: исследование типового алгоритма тепловизионного обследования электрооборудования;
- третья задача: расчет экономической эффективности оценки технического состояния электрооборудования с помощью тепловизионных обследований.

Аварийные повреждения электрооборудования приводят к нарушению электроснабжения и значительным экономическим затратам, а в некоторых случаях к катастрофам техногенного характера.

Тепловизионный контроль следует относить к мероприятиям, в составе системы планово-предупредительного ремонта «по состоянию», которые требуют экономического расчета с определением эффекта, как в натуральном, так и денежном выражении.

1 Оценка влияния факторов на показатели надежности электротехнического оборудования

1.1 Критерии оценки состояния электротехнического оборудования

В настоящее время идентификация дефектов электротехнического оборудования по результатам тепловизионного контроля становится все более актуальной. Основные неисправности наиболее распространенных видов электротехнического оборудования представлены на рисунке 1.

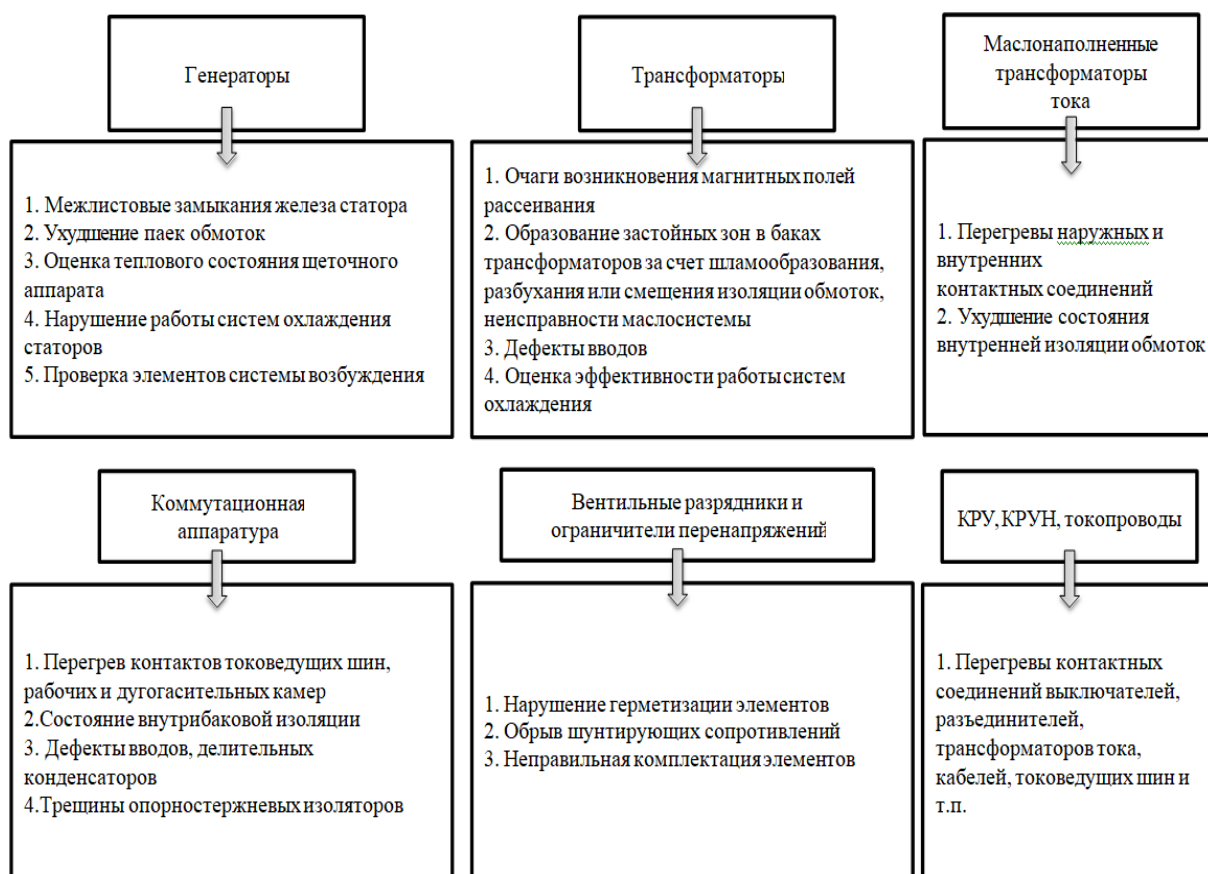


Рисунок 1 – Неисправности электротехнического оборудования

Наиболее важным критерием при проведении тепловизионного обследования является «достоверность и точность полученной информации о состоянии оборудования» [29]. Стоит упомянуть, что на сегодняшний день не существует метода неразрушающего контроля, данные которого можно было

бы считать однозначно достоверными. Ситуация, при которой исправный объект будет признан дефектным. В нормативной документации принята система бальной оценки состояния электротехнического оборудования, в зависимости, от величины которой определяется вид технического воздействия. Зависимость видов технического состояния электротехнического оборудования от величины индекса технического состояния с расшифровкой их функций согласно [19] представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение дефектов контактных соединений

Индекс технического состояния	Вид технического состояния	Функция вида технического состояния
$I_{TC} \leq 25$	Критическое	Измеренные параметры находятся за пределами предельно-допустимых значений, определенных нормативной и технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией
$25 < I_{TC} \leq 50$	Неудовлетворительное	Измеренные параметры находятся на уровне предельно-допустимых значений, определенных нормативной и технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией, оборудование выполняет требуемые функции не в полном объеме
$50 < I_{TC} \leq 70$	Удовлетворительное	Измеренные параметры находятся в пределах значений, определенных нормативной и технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией, но возникает угроза наступления отказов
$70 < I_{TC} \leq 85$	Хорошее	измеренные параметры находятся в пределах значений, определенных нормативной и технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией, но появилась тенденция ухудшения значения такого параметра
$85 < I_{TC} \leq 100$	Очень хорошее	Отсутствует отклонение измеренных параметров от требований нормативной и технической и (или) конструкторской (проектной) документации, оборудование выполняет требуемые функции в полном объеме

Виды технического воздействия в зависимости от индекса технического состояния показаны на рисунке 2.



Рисунок 2 – Виды технического воздействия в зависимости от индекса технического состояния

В настоящее время согласно руководящим документам [30, 31] «выработаны подходы, позволяющие оценить работу оборудования, которые применимы к большинству видов электротехнического оборудования:

- сравнение средней температуры элементов электротехнического оборудования, с аналогичным оборудованием которое работает с одинаковой нагрузкой и в одинаковых условиях окружающей среды» [9];
- сравнение температуры конструктивных элементов, с данными типовых заводских испытаний, либо результатами испытаний нового оборудования на этапе ввода в эксплуатацию;

- Сравнение избыточной температуры элементов электротехнического оборудования с указанными в руководящих документах величинами.

Анализ типовых результатов тепловизионного контроля и многочисленный опыт его проведения [32,33,34,35] в зарубежных и [1,2,5,6] отечественных источниках, позволяет установить среднюю разницу температур, характерную для каждого вида конструктивного элемента оборудования. Критерии отбраковки по избыточной температуре контактных соединений с учетом факторов влияющих на точность измерений показаны на рисунке 3.



Рисунок 3 – Критерии отбраковки по избыточной температуре контактных соединений

Таким образом, для оценки состояния электротехнического оборудования можно выполнить расчет и анализ его критериев для принятия решения по техническому воздействию, сводя к минимуму величину неопределенности и как следствие снижение последствий аварийных ситуаций.

1.2 Структура и алгоритм тепловизионной диагностики электротехнического оборудования

Для наиболее эффективного диагностирования состояния электро - технического оборудования, на предприятии необходимо выделять подразделение тепловизионного контроля. Практика показывает, что выполнение тепловизионных обследований и анализ их результатов, выполняемых специалистами по высоковольтным испытаниям или ремонтниками, являются не достоверными, из-за отсутствия специальных знаний либо других субъективных причин.

Структурная схема тепловизионной диагностики электротехнического оборудования состоит из комплекса технологических операций и показанных на рисунке 4.

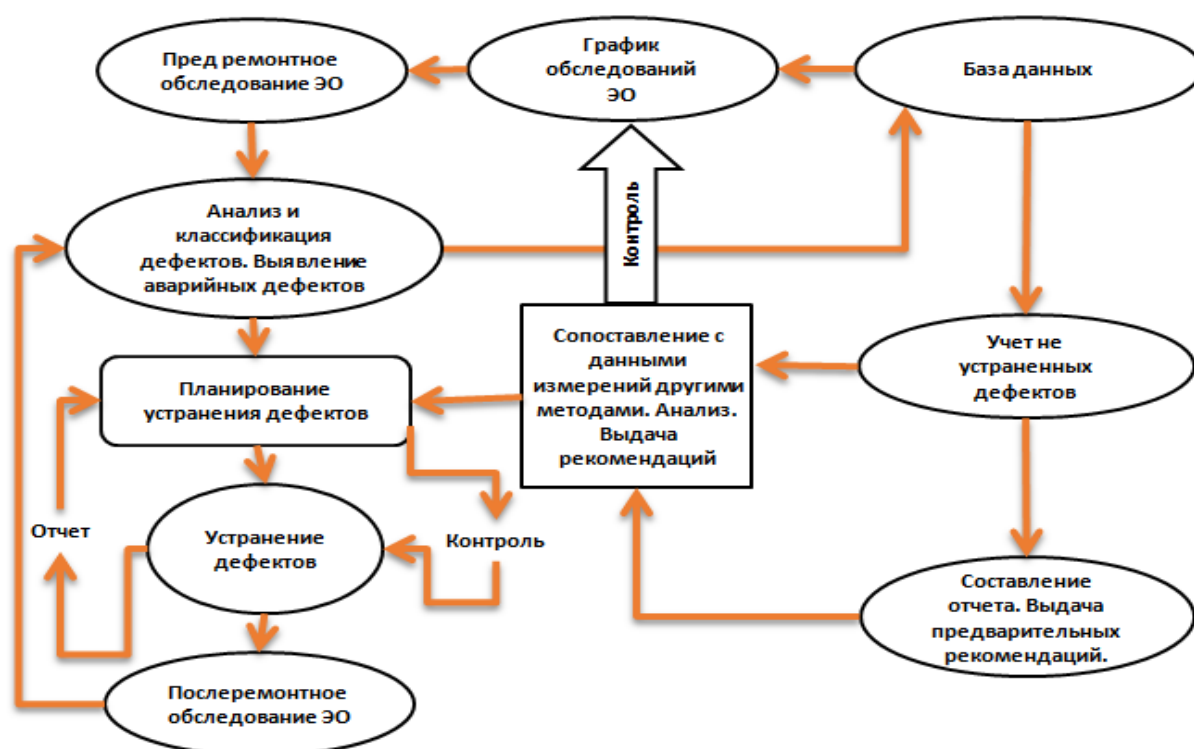


Рисунок 4 – Структурная схема тепловизионной диагностики электротехнического оборудования

Алгоритм проведения тепловизионной диагностики электротехнического оборудования показан на рисунке 5, основными методами реализации которого, являются сравнение, сопоставление температурных параметров, а также проверка работоспособности составных элементов тепловым методом.



Рисунок 5 – Структурная схема алгоритма проведения тепловизионной диагностики электротехнического оборудования

База данных электротехнического оборудования позволяет осуществлять непрерывное управление процессом мониторинга и контроля состояния обследуемого электротехнического оборудования. Минимальная информация, об оборудовании содержащаяся в базе данных должна отражать сведения об электротехническом оборудовании, подлежащему тепловизионной диагностике, а также данные обо всех выполненных ранее

обследованиях. Создание базы данных предпочтительнее вести на основе программного обеспечения производителя тепловизионного оборудования.

В качестве примеров программных продуктов можно привести: AGEMA Database и ThermaCAM Database.

Недостатком использования программного обеспечения изготовителя тепловизионного оборудования является то, что оно позволяет «оперировать только теми данными, которые находятся в составе отчетов о тепловизионном обследовании. Построение же структуры, позволяющей анализировать и управлять процессом тепловизионного обследования потребует значительных затрат времени и высокой квалификации специалистов исполнителей» [8].

График проведения тепловизионной диагностики составляется на основе графиков ремонтов электротехнического оборудования составляемый ремонтным подразделением предприятия. Интервалы между операциями диагностики могут быть сокращены по необходимости, например, для отслеживания динамики дефекта.

Решение о сокращении интервалов контроля состояния электротехнического оборудования принимает непосредственный руководитель, в чьем подчинении находится подразделение тепловизионной диагностики.

С точки зрения безопасного производства работ в электроустановках, такое подразделение должно состоять не менее чем из трех человек. Если в существующей структуре предприятия наличествует подразделение выполняющие диагностику, измерения и испытания электротехнического оборудования (лаборатория, участок, служба, цех), то такое подразделение целесообразно ввести в его состав.

Предремонтное и послеремонтное обследование, электротехнического оборудования, проводят в соответствии с графиком по заранее разработанным и утвержденным программам и методикам.

Анализ, при котором определяют параметры дефектов, степень их важности и основываясь на практическом опыте формируют прогноз по

качеству или остаточному ресурсу элементов электротехнического оборудования. Критерии и диагностические параметры содержатся в руководящей и нормативной документации, так же по информации производителей электротехнического оборудования.

Таким образом, процесс анализа дефектов элементов оборудования по результатам тепловизионной диагностики можно объединить в блок – «контроль состояния оборудования», включающий в себя:

- определение опасности дефекта по фиксированной предельной температуре нагрева;
- определение состояния элементов с учетом погрешностей;
- определение времени до наступления отказа оборудования.

На данном этапе необходимо выявить аварийные дефекты, которые подлежат немедленному устранению. Данная информация должна быть доведена до руководящего персонала ремонтной службы.

Учет не устраненных дефектов осуществляет персонал подразделения тепловизионной диагностики. Неустранимый дефект с точки зрения последствий для электротехнического оборудования – состояние оборудования при котором температурный градиент остался не неизменным либо стал более опасным. Информация о не устраненных дефектах в обязательном порядке включается в отчет о тепловизионной диагностике.

Составление отчета по результатам тепловизионной диагностики проводится на основании данных анализа и классификации выявленных дефектов. На этом этапе производится сопоставление результатов с результатами контроля выполненных другими методами, например, визуальном контроле в ультрафиолетовом спектре.

Планирование устранения дефектов проводится на основании отчета с учетом рекомендаций по результатам тепловизионной диагностики. Для устранения аварийных дефектов должна быть сформирована аварийная заявка на вывод электротехнического оборудования из работы. По факту устранения

выявленных дефектов заполняется ремонтная и эксплуатационная документация, данные из которой актуализируются в базе данных.

Подготовка рекомендаций для эксплуатирующей организации, на основании определения экспертом опасности дефекта, технологически относится ко второй группе методов тепловизионного контроля.

Проблема в этой группе связана с отсутствием данных о выработанном ресурсе оборудования на этапе, первичного тепловизионного контроля, и принятие решения остается за конечным пользователем или эксплуатирующей организацией. Пример термической съемки кабельных линий представлен на рисунке 6.

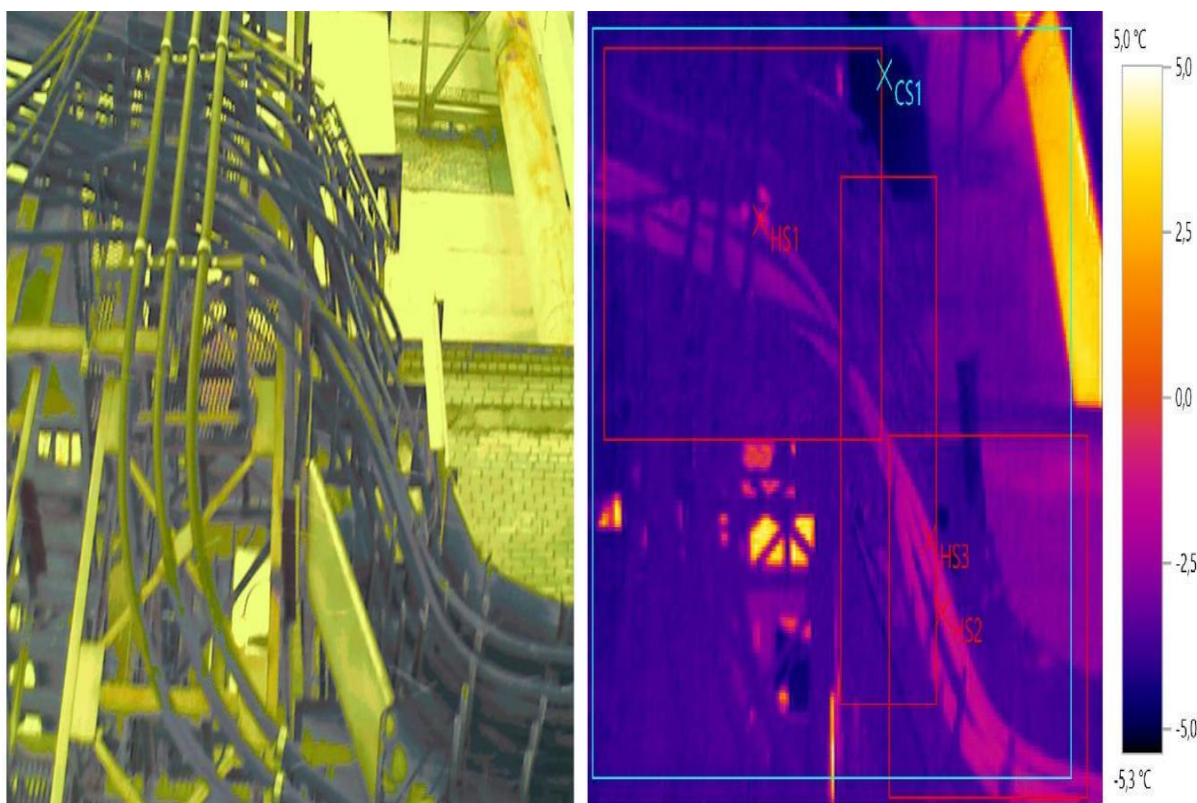


Рисунок 6 – Тепловизионная съемка кабельных линий

Следовательно, для оценки остаточного ресурса можно применить методы моделирования, например— термического старения, до появления микротрещин в изоляции, которые можно фиксировать при телевизионном

контроле высокого разрешения. Анализ исследований показывает, что, например, кабельная продукция, подвергнутая термостарению в течение 1500 часов, подтверждает свой 40-летний ресурс.

Процесс диагностики электротехнического оборудования можно условно разделить на три этапа: подготовки, производство технологических операций по диагностике и обработка результатов с выдачей заключения. Этап подготовки к диагностике состоит из сбора, изучения, и документирования сведений об электротехническом оборудовании и контактных соединениях его элементов. Собранные сведения целесообразно заранее включить в бланк диагностики, оформляемый в табличной форме и заполняемый по мере выполнения диагностических мероприятий.

С целью дальнейшего облегчения статистической обработки и анализа результатов диагностики, и выполнение технико-экономических расчетов необходимо составить перечень обследуемого электрооборудования, его размещения на территории ОРУ, ЗРУ, ТП, ЦТП, включая оперативные наименования присоединений и электрооборудования. «Перечень диагностируемых присоединений с указаниями принадлежности к подразделениям эксплуатирующие данные участки, с указанием контактными данными» [6]. Количество элементов электрооборудования в пределах этих присоединений.

Для решения задачи по оценке опасности дефекта по результатам диагностики (в случае работы при не полной нагрузке) выполняются расчеты по переводу в относительные единицы по отношению к номинальной нагрузке при 20°C и отсутствии ветра, алгоритм программы пересчета температурных перегревов отдельных элементов электротехнического оборудования показан на рисунке 7.



Рисунок 7 – Алгоритм пересчета температуры при различной ветровой нагрузке

«Паспортные или технологические данные об диагностируемом оборудовании и контактных соединениях таких как, номинальные напряжения и токи единиц присоединения, коэффициент мощности нагрузки, виды контактных присоединений (сварные, болтовые, разъемные, неразъемные), материал контактных соединений (медь, алюминий и сплавы), особенности режима работы продолжительный, кратковременный, с полной или частичной загрузкой» [9].

«Для оптимизации рабочего времени при производстве работ в обследуемом электрооборудовании необходимо получить и изучить электрические схемы электрооборудования– наличие и вид изоляционной среды, расположение и устройство токоведущих контуров, наличие и расположение частей с органической изоляцией (как наиболее подверженной

ползущим разрядам), расположение шунтирующих сопротивлений вентильных разрядников и других элементах электрооборудования нагреваемых в процессе работы с учетом их конструктивных особенностей. Например, схема заземления и конструкция магнитной системы и обмоток» [9] силовых трансформаторов позволяет более точно обнаружить и локализовать места температурных аномалий.

Для «определения видов и типов электрооборудования и контактных соединений наиболее критичных с точки зрения повреждаемости и на которые следует обратить внимание при проведении диагностики необходимо иметь сведения о дате ввода в работу и статистике повреждений диагностируемого электрооборудования и контактных соединений— за возможно больший период, сведения о проведении капитальных и текущих ремонтах, модернизации и реконструкции» [9].

Перед проведением диагностики необходимо провести визуальный осмотр мест установки электрооборудования, ознакомиться с его расположением в пределах энергообъекта, определить ракурс и «дистанцию съемки, выявить объекты и факторы, которые могут исказить результаты диагностики.

Если электрооборудование содержит в своем составе элементы с неизвестным коэффициентом излучения, то перед проведением диагностических мероприятий, необходимо на аналогичной части такого же элемента, наработавшего такой же срок эксплуатации и в тех же условиях» [9], провести экспериментальное определение вышеуказанного коэффициента.

С точки зрения обеспечения безопасности работ диагностику выполняют два человека— руководитель работ, который контролирует выполнение правил охраны труда при работе в электроустановках и термографист который работает с тепловизионным оборудованием. Блок схема организации группы термографического контроля представлена на рисунке 8.

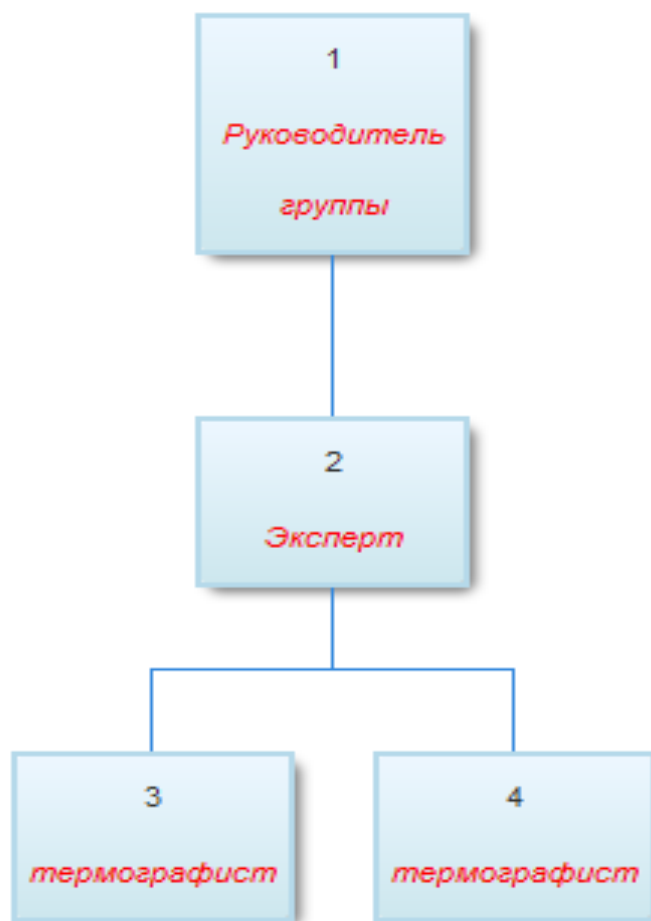


Рисунок 8 – Блок схема организации группы термографического контроля

При проведении обследования желательно использовать готовые типовые бланки.

«Существенный рост потребления электрической энергии связан с качественным изменением потребителей. Последнее определено введением новых технологий и углублением электрификации разных производств, что приводит к увеличению зависимости нормального функционирования потребителей от надежности снабжения электрической энергией» [8].

Пример реализации обнаруженных дефектов методом тепловизионной диагностики электротехнического оборудования приведен на рисунках 9-10.

Методология тепловизионной диагностики, в энергетике и строительстве подробно описана в [1,2,5,6,7,8,9].

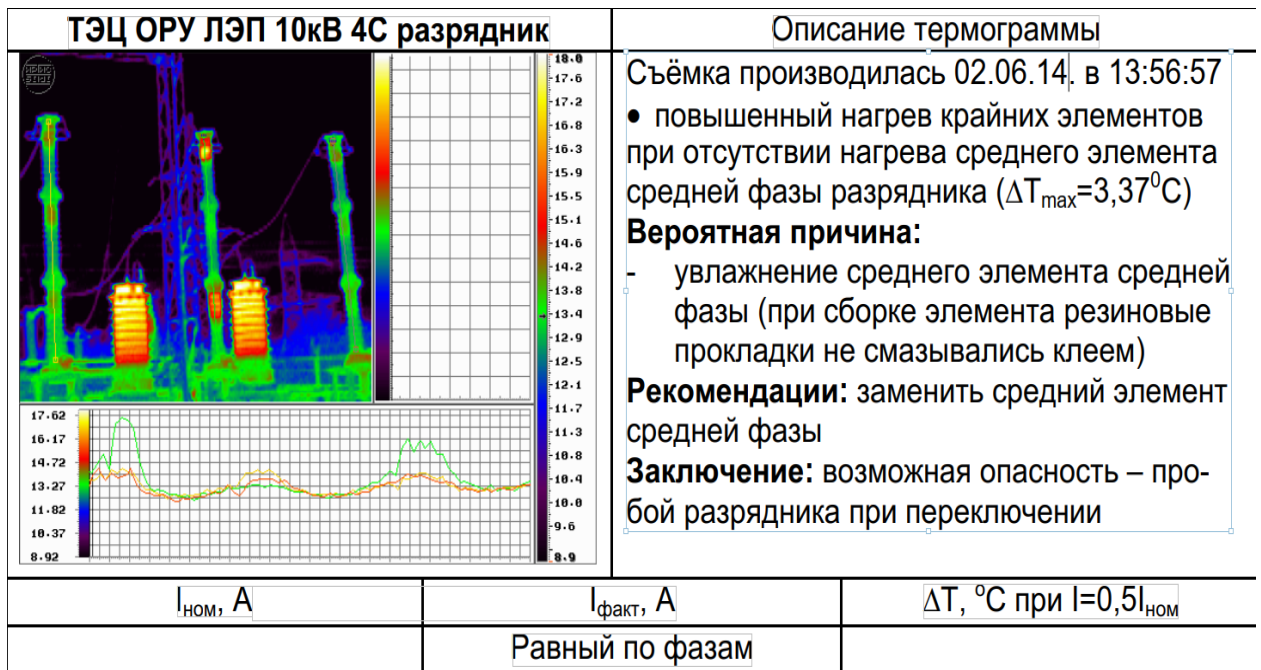


Рисунок 9 – Пример температурного дефекта разрядника, обнаруженного методом тепловизионной съемки

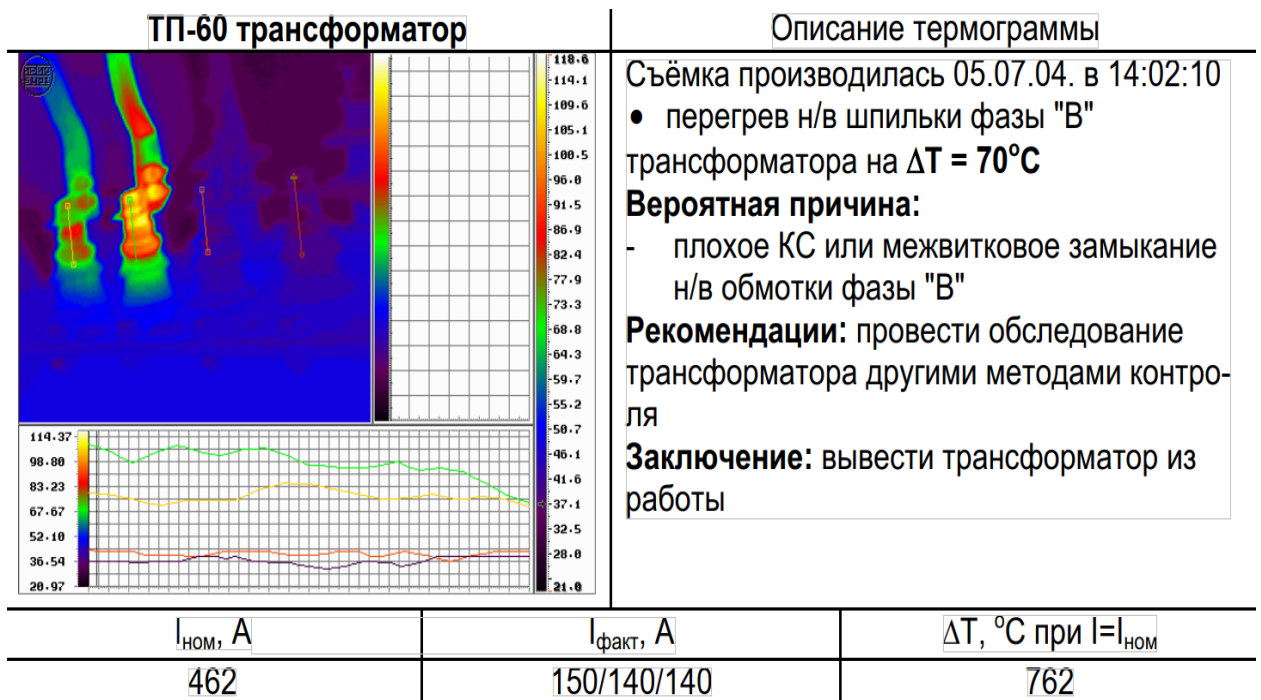


Рисунок 10 – Пример температурного дефекта высоковольтного ввода трансформатора, обнаруженного методом тепловизионной съемки

Пример термограммы, когда тепловизионная диагностика ведется в условиях, отсутствия видимости контактных соединений, показан на рисунке 11.

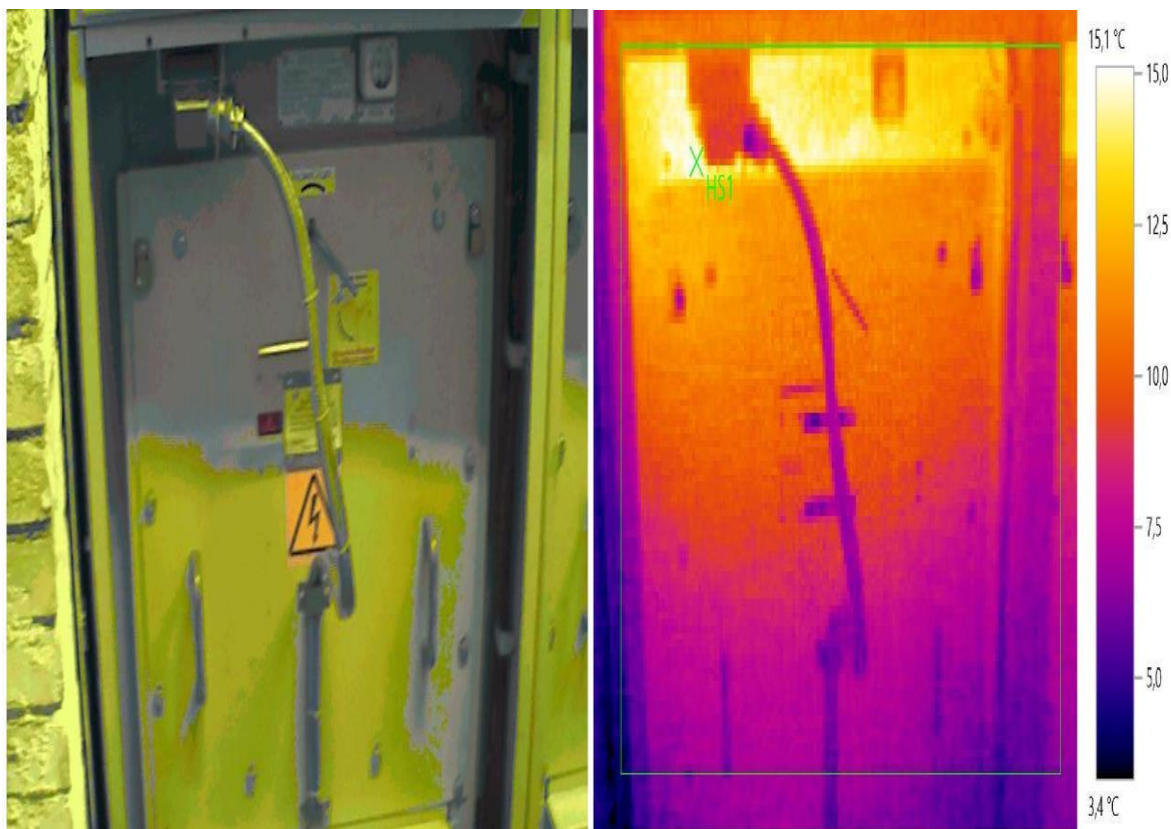


Рисунок 11 – Пример диагностики методом тепловизионной съемки РУ10кВ, через ограждающие элементы ячейки

В случаях, показанных на рисунках 9-10 и обнаружении таких дефектов эксперт оформляет в бланке отчета вероятную причину температурной аномалии и дает заключение об опасности обнаруженного дефекта в процессе эксплуатации электротехнического оборудования. Делается заключение о причинах возможно некачественного ремонта. В случае, показанном на рисунке 11, эксперт должен назначить повторное проведение тепловизионного обследования, так как данные полученные при такой съемке являются не достоверными.

1.3 Проведение оценки влияния факторов на показатели надежности электротехнического оборудования методом ранговой корреляции

Чем больше времени электротехническое оборудование находится в работе, тем больше возникает дефектов, за развитием которых следует переход к состоянию отказа и последующими за ним аварийный и внеплановые ремонты вышедшего из строя электротехнического оборудования.

Как показывает опыт, раннее выявленных отклонений, самыми распространенными являются– дефекты контактных соединений. Распределение дефектов контактных соединений в зависимости от их типов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Распределение дефектов контактных соединений

Электротехническая арматура	Относительное число обнаруженных дефектов, %
Аппаратные контактные зажимы	65
Болтовые соединения	15
Подвижные контакты	20

Ежегодные обследования электротехнического оборудования с регистрацией образующихся дефектов говорят о постоянно действующих факторах старения контактных элементов оборудования либо о несвоевременном или не качественном ремонте. В таком случае для определения влияния факторов необходимо воспользоваться критериями, так называемыми непараметрическими критериями оценки надежности в виде сумм рангов и среднего значения суммы рангов. Такой вариант позволяет не учитывать время распределения дефектов контактных соединений во времени

и позволяет избежать ошибок с выбором закона распределения. Однако возможность предупредить аварию и выход из строя дорогостоящего оборудования без данных о наблюдениях и оценка вероятности безотказной работы после факта отказа, являются не возможными. Поэтому любой набор данных об обследовании элементов электротехнического оборудования должен сначала подвергаться не параметрическим методам анализа, а затем на основе принятой гипотезы подвергнут параметрическому методу анализа.

«Возможен случай совместного применения параметрического и не параметрического методов анализа для формализации состояния электротехнического оборудования» [8]. Источниками информации для принятия решений об отклонении параметров и наличии дефектов, должны быть накопленные данные об измерениях параметров электротехнического оборудования.

«Первый массив данных представляет собой параметрические данные о динамике развития дефектов и повреждений, а второй – показатели надежности. Также необходимо ориентироваться на ремонтные и эксплуатационные документы, материалы специальных исследований, акты расследования аварий и рекламации, которые могут выступать в качестве дополнительных источников информации» [8].

«Основой для оценки показателей надежности при непараметрическом анализе являются опыт, знания и интуиция (предвидение) специалистов-экспертов, что является наиболее приоритетным для анализа и обоснования воздействия различных факторов» [8].

«Экспертные оценки, с точки зрения ответственности за принятые решения бывают следующими:

- индивидуальные оценки одного специалиста. В контексте мониторинга (осмотров) и диагностики – это качественная оценка электротехническим персоналом состояния оборудования, согласно идентифицирующим параметрам.

– коллективные– совещание специалистов в области электроэнергетики, направленное на подготовку информации к принятию решения с учетом коллективного мнения» [8].

Оценка влияния факторов на показатели надежности электротехнического оборудования определяется методом нахождения коэффициента (конкордации Кендалла) множественной ранговой корреляции. Обработка анкет специалистов-экспертов выражается по важности того либо иного показателя надежности электрооборудования без оценки важности или опасности таких показателей и отображаются на соответствующей шкале.

Практическое решение типовой задачи ранговой корреляции факторов, оказывающих наибольшее влияние на величину потока отказов, объекта (17 подстанций с ОРУ 110кВ). Данный анализ основан на коллективной оценке каждого фактора влияющего на показатели надежности электротехнического оборудования. Так как величина коэффициента конкордации всегда меньше единицы, то для снижения погрешности анализа необходимо, чтобы количество специалистов-экспертов было не менее числа факторов, учитываемых при оценке показателей надежности. Количество факторов, подлежащих оценке должно быть от трех до семи. Перечень факторов, оказывающих влияние на показатели надежности представлен в таблице 3, где место фактора соответствует его важности.

Таблица 3 – Перечень факторов, оказывающих влияние на показатели надежности

Номер фактора	Фактор, влияющий на показатель надежности
1	Наработка оборудования
2	Качество электротехнического оборудования и его монтажа
3	Количество коротких замыканий
4	Максимальная нагрузка за время эксплуатации
5	Погодные условия
6	Качество эксплуатационного обслуживания
7	Количество резервного оборудования

Наиболее важный фактор располагается на первой строке и имеет первый ранг. Обработку анкет специалистов-экспертов для наглядности представлена в виде матрицы рангов в таблице 4.

Таблица 4 – Матрица значимости факторов по анкетам специалистов-экспертов

Специалисты-эксперты	Фактор, влияющий на показатель надежности						
	1	2	3	4	5	6	7
специалист-эксперт 1	1	2	5	6	4	3	7
специалист-эксперт 2	3	1	5	4	6	2	7
специалист-эксперт 3	6	1	7	4	5	3	2
специалист-эксперт 4	1	2	3	4	5	6	7
специалист-эксперт 5	2	1	5	6	4	3	7
специалист-эксперт 6	5	1	3	4	6	2	7
специалист-эксперт 7	3	4	1	2	5	6	7
сумма рангов фактора	21	12	29	30	35	25	44
среднее значение суммы рангов	28						
абсолютное отклонение	7	16	1	2	7	3	16

С связи с тем, что во мнениях экспертов присутствуют связанные ранги, необходимо переформировать матрицу. На основании переформирования рангов строится новая матрица и ее данные заносятся в таблицу 5.

Таблица 5– Матрица значимости факторов по анкетам специалистов-экспертов с учетом связанных рангов

Специалисты-эксперты	Фактор, влияющий на показатель надежности						
	1	2	3	4	5	6	7
специалист-эксперт 1	1,5	4,5	7	1,5	3	6	4,5
специалист-эксперт 2	5,5	2,5	2,5	5,5	2,5	2,5	7
специалист-эксперт 3	5	5	7	2,5	5	2,5	1
специалист-эксперт 4	6,5	3,5	3,5	3,5	6,5	3,5	1
специалист-эксперт 5	1,5	6,5	4	4	1,5	6,5	4
специалист-эксперт 6	3,5	1	3,5	6,5	3,5	3,5	6,5
специалист-эксперт 7	4,5	4,5	1	4,5	4,5	4,5	4,5
сумма рангов фактора	28	27,5	28,5	28	26,5	29	28,5
среднее значение суммы рангов	28						
абсолютное отклонение	0	0,5	0,5	0	1,5	1	0,5

Таким образом значимость исследуемых факторов распределилась как показано в таблице 6.

Таблица 6– Перечень факторов, оказывающих влияние на показатели надежности по ранговым оценкам специалистов-экспертов

Ранг	Фактор, влияющий на показатель надежности
1	Погодные условия
2	Качество электротехнического оборудования и его монтажа
3	Наработка оборудования
4	Максимальная нагрузка за время эксплуатации
5	Количество коротких замыканий
6	Количество резервного оборудования
7	Качество эксплуатационного обслуживания

Оценка степени согласованности мнений всех специалистов-экспертов, осуществляется расчетным методом определения коэффициента конкордации для одинаковых значений рангов в оценках одного эксперта по формуле.

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot m^2(n^3 - n) - m \cdot \sum T_i} \quad (1)$$

где «S – сумма квадратов разностей рангов;

n – число факторов;

m – количество экспертов

T_i – число связей в оценках i-го эксперта.

$$T_i = \frac{1}{12} \sum (t_j^3 - t_j) \quad (2)$$

где t_j – количество повторяющихся элементов в i-й связке i-го эксперта» [8].

Результаты вычислений по формуле (2):

$$T_1 = [(23-2) + (23-2)]/12 = 1$$

$$T_2 = [(23-2) + (43-4)]/12 = 5,5$$

$$T_3 = [(33-3) + (23-2)]/12 = 2,5$$

$$T_4 = [(23-2) + (43-4)]/12 = 5,5$$

$$T_5 = [(23-2) + (23-2) + (33-3)]/12 = 3$$

$$T_6 = [(43-4) + (23-2)]/12 = 5,5$$

$$T_7 = [(63-6)]/12 = 17,5$$

$$\sum T_i = 1 + 5,5 + 2,5 + 5,5 + 3 + 5,5 + 17,5 = 40,5$$

Соответственно коэффициент множественной ранговой корреляции по формуле (1) равен:

$$W = \frac{4}{\frac{1}{12} \cdot 7^2(7^3 - 7) - 7 \cdot 40,5} = 0,00367.$$

Значение коэффициента менее трех десятых говорит о наличии слабой степени согласованности мнений специалистов-экспертов в смысле их коррелированности.

Слабая коррелированность мнений специалистов-экспертов говорит о высоком влиянии производственных факторов на минимизацию которых следует обращать внимание и принимать адекватные меры по уменьшению их воздействия. В то же время можно с уверенностью сказать о преобладающем влиянии атмосферных и климатических условий на надежность контактных соединений электротехнического оборудования открытых распределительных устройств. Влияние атмосферных и климатических условий проявляются в виде перенапряжений в период гроз, а также влиянием воздействия промышленных объектов, находящихся вблизи подстанций.

1.4 Проведение проверки соответствия статистических теорий критерию Пирсона

Рассмотрим применение статистических гипотез на примере тепловизионного обследования электротехнического оборудования. Например, на объекте с 384 единицами оборудования, за двенадцать лет наблюдений, в результате тепловизионной диагностики были обнаружены дефекты, показанные в таблице 7.

Таблица 7 – Исходные данные тепловизионного обнаружения дефектов электротехнического оборудования

Год наблюдения	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Количество дефектов	5	4	4	2	0	8	0	11	3	2	3	2

Определение числа групп при ширине интервала равного одному году: $h=1$

$$W = \frac{X_{max} - X_{min}}{h} = \frac{11 - 0}{1} = 11 \quad (3)$$

где X_{max} – максимальное значение распределения;

X_{min} – минимальное значение распределения.

Определим границы группы и внесем данные в таблицу 8.

Таблица 8 – Данные для группировки границ распределения

Группа распределения	Нижняя граница распределения	Верхняя граница распределения
1	0	1
2	1	2
3	2	3

Продолжение таблицы 8

Группа распределения	Нижняя граница распределения	Верхняя граница распределения
4	3	4
5	4	5
6	5	6
7	6	7
8	7	8
9	8	9
10	9	10
11	10	11

«Одно и тоже значение признака служит верхней и нижней границами двух смежных (предыдущей и последующей) групп. Для каждого значения ряда подсчитаем, какое количество раз оно попадает в тот или иной интервал. Для этого сортируем ряд по возрастанию» [8]. Результаты группировки сведем в таблицу 9.

Таблица 9 – Преобразование данных группировки границ распределения

Группы распределения	Номер совокупности распределения	Частота распределения f_i
0 – 1	5,7	2
1 – 2		0
2 – 3	4,10,12	3
3 – 4	9,11	2
4 – 5	2,3	2
5 – 6	1	1
6 – 7		0
7 – 8		0
8 – 9	6	1
9 – 10		0
10 – 11	8	1

Для оценки ряда распределения найдем следующие показатели:

- Показатели центра распределения определяются по формуле

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i f_j}{h \sum f_i} = \frac{49}{12} = 4,083 \quad (4)$$

- Мода наиболее часто встречающееся значение признака у единиц данной совокупности.

$$M_0 = x_0 + h \frac{f_2 - f_1}{(f_2 - f_1) + (f_2 - f_3)} = 2 + 1 \frac{3 - 0}{(3 - 0) + (3 - 2)} = 2,75 \quad (5)$$

где x_0 – начало модального интервала;

h – величина интервала;

f_2 – частота, соответствующая модальному интервалу;

f_1 – пред модальная частота;

f_3 – после модальная частота.

Выбираем в качестве начала интервала 2, так как именно на этот интервал приходится наибольшее количество.

Медиана делит выборку на две части: половина вариант меньше медианы, а половина больше.

«Медиана служит хорошей характеристикой при ассиметричном распределении данных, т.к. даже при наличии «выбросов» данных, медиана более устойчива к воздействию отклоняющихся данных. В интервальном ряду распределения сразу можно указать только интервал, в котором будут находиться мода или медиана. Медиана соответствует варианту, стоящему в середине ранжированного ряда. Медианным является интервал 2 - 3, т.к. в этом интервале накопленная частота S , больше

медианного номера (медианным называется первый интервал, накопленная частота S которого превышает половину общей суммы частот)» [8].

«Определив значение медианы получаем что, 50% единиц совокупности будут меньше по величине чем $Me=3,5$. В симметричных рядах распределения значение моды и медианы совпадают со средней величиной ($x_{cp}=Me=Mo$)» [8].

Среднее значение изучаемого признака по способу моментов

$$\bar{x} = \frac{x_i f_i}{\sum f_i} h + A = 2,5 \quad (6)$$

где «A – условный нуль, равный варианте с максимальной частотой (середина интервала с максимальной частотой),
h – шаг интервала» [8].

Данные для расчетов сводим в таблицу 10.

Таблица 10 – Исходные данные для расчета показателей

Группы распределения	Середина интервала распределения, $x_{центр}$	Количество, f_{i}	$x_i f_i$	Накопленная частота, S
0 - 1	0,5	2	1	2
1 - 2	1,5	0	0	2
2 - 3	2,5	3	7,5	5
3 - 4	3,5	2	7	7
4 - 5	4,5	2	9	9
5 - 6	5,5	1	5,5	10
6 - 7	6,5	0	0	10
7 - 8	7,5	0	0	10
8 - 9	8,5	1	8,5	11
9 - 10	9,5	0	0	11
10 - 11	10,5	1	10,5	12

Определим средний квадрат отклонений по формуле моментов.

$$\bar{x} = \frac{[x_i]^2 f_i}{\sum f_i} h^2 + (\bar{x} - A)^2 = \frac{127}{12} 1^2 - (4.083 - 2.5)^2 = 8.076 \quad (7)$$

Откуда определяем среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{8.076} = 2.842 \quad (8)$$

«Проверим гипотезу о том, что X распределено по закону Пуассона.

$$p_i = \frac{\lambda^i}{i!} \cdot e^{-\lambda} \quad (9)$$

где p_i – вероятность попадания в i -й интервал случайной величины, распределенной по гипотетическому закону» [9].

Принимаем в качестве оценки параметра λ распределения Пуассона выборочную среднюю $x_{cp} = 4.083$. Следовательно, предполагаемый закон Пуассона имеет вид:

$$p_i = \frac{\lambda^{4.083}}{i!} \cdot e^{-4.083} \quad (10)$$

Далее определяем вероятности событий в испытаниях. объединив малочисленные частоты: и соответствующие им теоретические частоты и рассчитываем слагаемые статистики Пирсона по формуле:

$$K = \sum \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (11)$$

Полученные при расчетах данные вносим в таблицу 11.

Таблица 11 – Данные расчетов слагаемых статистики Пирсона

Интервал	Теоретическая частота	Вероятность попадания в <i>i</i> -й интервал случайной величины	Ожидаемая частота np_i	Слагаемые статистики Пирсона K_i
0	2	0,08566	1,0279	0,919
1	3	0,1405	1,6858	1,024
2	2	0,1912	2,2946	0,0378
3	2	0,1952	2,3424	0,05
4	1	0,1594	1,913	0,436
5	1	0,2041	2,4489	0,857
6	1	0,02064	0,2477	2,285
-	12	-	-	5,61

«Граница критической области определяется как разница между эмпирическим и теоретическим распределениями, то чем больше ее наблюдаемое значение, тем сильнее довод против основной гипотезы. Поэтому критическая область для этой статистики всегда правосторонняя. Её границу находим по таблицам распределения и заданным значениям числа интервалов. Наблюдаемое значение статистики Пирсона не попадает в критическую область» [9]:

$$K_{\text{набл}} < K_{\text{кр}} \quad (12)$$

На основании выполнения неравенства делаем заключение о том, что данные выборки имеют распределение Пуассона, то есть ряд событий является простейшим.

Для электротехнического оборудования функция длительности устранения отказов может отличаться от экспоненциальной, в отличие от функции наработки электротехнического оборудования. Чаще всего длительность устранения отказов описываются логарифмически-нормальными или нормально-усеченными законами распределения.

Выводы по первому разделу:

- Рассмотрены критерии оценки состояния электротехнического оборудования. Показано, что вид технического воздействия зависит от индекса технического состояния и средней разнице температур, полученной при тепловизионном обследовании, с учетом факторов влияющих на достоверность результатов диагностики.
- Составлена структурная схема проведения тепловизионной диагностики электротехнического оборудования. Для составленной структурной схемы описан типовой алгоритм тепловизионной диагностики электротехнического оборудования. Рассмотрены примеры заключения об остаточном ресурсе или опасности обнаруженного дефекта.
- Проведены расчеты оценки влияния факторов на показатели надежности электротехнического оборудования методом ранговой корреляции. Расчётным путем установлено, что на мнения специалистов-экспертов существенное влияние оказывают производственные факторы, влияние которых может быть снижено при последующих анализах.
- Рассмотрено применение статистических гипотез на примере соответствия критерию Пирсона. Расчетным методом установлено, что распределение дефектов за исследуемый интервал можно описать экспоненциальным законом распределения. Установлено, что использование критерия Пирсона позволяет детализировать состояние наблюдаемых единиц электротехнического оборудования.

2 Исследование типового алгоритма тепловизионного обследования электрооборудования

2.1 Анализ организации системы тепловизионной диагностики электротехнического оборудования при техническом обслуживании

Техническое обслуживание по факторной реализации предусматривает два метода основанных на анализе его прошлых состояний:

- статистический метод обработки данных, основанный на данных об отказах электротехнического оборудования аналогов;
- экстраполяционный метод, основанный на анализе предыдущих состояний конкретного электротехнического оборудования.

Для внедрения, так называемого эффективного управления электротехническим оборудованием со сроком службы выше нормативного и предотвращения аварий необходимо внедрить систему тепловизионной диагностики электротехнического оборудования, как часть системы контроля технического состояния. В чистом виде применение статистического метода возможно при эксплуатации простого не дорогостоящего оборудования, резервируемого другим электротехническим оборудованием, отказ которого не приводит к технологическим нарушениям основного оборудования или технологического цикла.

Тепловизионный контроль электрооборудования – является первым в применении теплового метода неразрушающего контроля для нужд промышленных предприятий непосредственно при производстве работ.

Для построения организации системы тепловизионной диагностики электротехнического оборудования рассмотрим функции, представленные на рисунке 12, и сгруппируем их в три функциональные подсистемы, направленные на повышение эффективности технического обслуживания и

образованию стимулов для предоставления реальной информации о состоянии электротехнического оборудования.



Рисунок 12 – Функции тепловизионной диагностики электротехнического оборудования

Типовой алгоритм проведения тепловизионной диагностики электротехнического оборудования представлен на рисунке 13.

Электротехническое оборудование характеризуется многомерностью и нелинейностью параметров.



Рисунок 13 – Типовой алгоритм тепловизионной диагностики электротехнического оборудования

В отечественной энергетике принята вертикальная система разграничения функций в зависимости от уровня ответственности

структурного подразделения. Наглядно такая система представлена на рисунке 14.

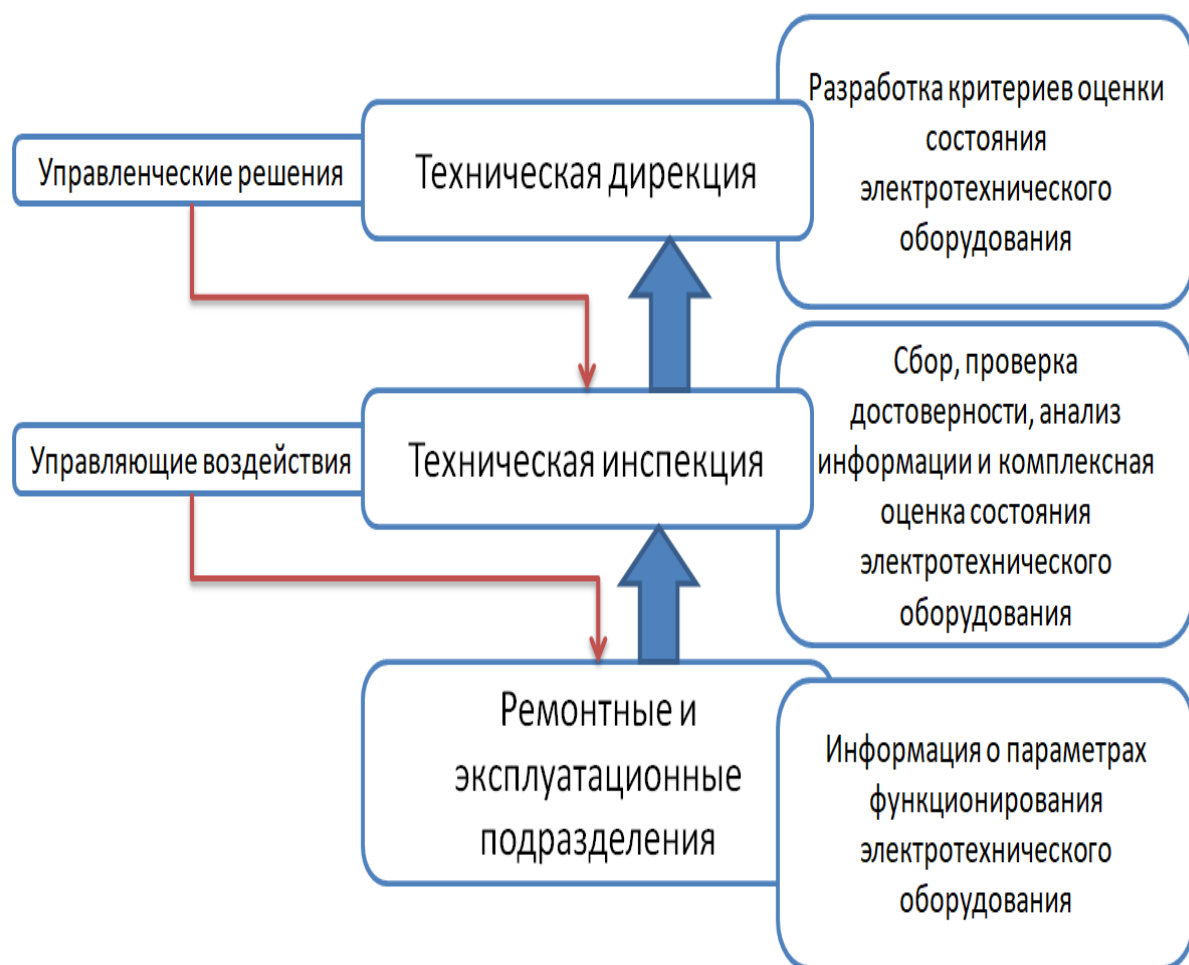


Рисунок 14 – Структурная схема системы контроля технического состояния электротехнического оборудования

Таким образом организация системы тепловизионной диагностики электротехнического оборудования находится в зоне ответственности технической инспекции либо другой штатной структуры ответственной за техническое состояние.

«Задачами, стоящими перед подразделениями по прогнозированию состояния электротехнического оборудования, являются:

- определение состояния элементов с учетом погрешностей;
- определение времени до наступления отказа оборудования;

- определение управляющих воздействий для достижения технических и экономических задач» [13].

Средствами для достижения вышеуказанных задач являются сценарное прогнозирование, стимулирование повышения эффективности ремонтов и управление рисками. Функциональная схема системы прогнозирования состояния электротехнического оборудования представлена на рисунке 15.



Рисунок 15 – Функциональная схема системы прогнозирования состояния электротехнического оборудования

Недостатком таких систем является тот факт, что функциональные зависимости работы моделей элементов электротехнического оборудования и требования руководящих документов и инструкций, учитывают работу конкретных схемных решений и конкретных владельцев такого оборудования и для внедрения такой системы на другом объекте требует доработки и

процедуры опытной эксплуатации. Даже точная отладка системы диагностирования электротехнического оборудования не гарантирует получения адекватных управленческих решений, так как все системы, эксплуатируемые в энергетике России, являются не обучаемыми, что соответственно влечет за собой необходимость авторского сопровождения компаний разработчиков таких систем.

При этом следует отметить, что эксперту технической инспекции электротехнического оборудования будет очевидно, что список методов неразрушающего контроля может быть дополнен и другими необходимыми диагностиками. Управляющие воздействия эксперта, технической инспекции, должны реализовываться только на тех областях контроля, на которых в соответствии с определенной зоной контроля должны быть выполнены диагностические мероприятия, при этом не тратить материальные и вычислительные ресурсы системы на распознавание дефектов на других участках, поскольку это относится к зоне ответственности прогнозирования сценариев достаточности мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту.

Идентификация процесса распознавания дефекта происходит следующим образом: зафиксированное изображение дефекта сопоставляется с имеющейся базой данных по виду оборудования, в соответствии с регламентом.

2.2 Анализ систем прогнозирования состояния электротехнического оборудования с целью определения его остаточного ресурса

«Структурно-технологический кризис, в котором находится современная электроэнергетика, требует качественно новых подходов и инфраструктуры, базирующихся на сетевой архитектуре, мультиагентном управлении, самоорганизации, интеллектуальности, масштабируемости,

отраслевой интеграции, удобстве и связанности с глобальным информационным пространством» [8].

«Эффективность функционирования электроэнергетических систем во многом зависит от инфраструктурного и технического оснащения и требует широкого внедрения интеллектуальных систем, обеспечивающих необходимую для дальнейшего технологического развития структуру. Одним из наиболее перспективных методов интеллектуализации электроэнергетики в части прогнозирования, управления, оптимизации и прочего является применение искусственных нейронных сетей. Увеличение доступных вычислительных возможностей и цифровая трансформация общества обуславливают возрастающую популярность использования интеллектуальных систем, что делает актуальным рассмотрение возможностей применения этой технологии в электроэнергетике» [8].

Достоверный прогноз играет большую роль в определении остаточного ресурса электротехнического оборудования. В вопросе определения остаточного ресурса наиболее перспективными является преимущество интеллектуальных систем «при диагностике и локализации аварийных ситуаций в силу их гибкости при значительных потоках данных и информационном шуме. В то же время существенным недостатком таких систем является длительный период обучения, для сокращения которого до приемлемых результатов могут применяться обобщённо-регрессионные системы с топологией прямой передачи сигнала, вероятностные системы и адаптивные нечёткие системы. Также крайне перспективным представляет применение этих систем для прогнозирования структурных катастроф, основной ущерб от которых вызывается каскадным разрушением связей между элементами» [8].

«Оценка надёжности позволяет решить проблему экспоненциального роста данных и реализовать эффективную схему ремонта электротехнического оборудования по состоянию» [11]. «Наиболее оптимальной моделью интеллектуальных систем для решения данной задачи

является многослойный персептрон в сочетании с интеллектуальных систем Хопфилда, ускоряющей работу системы» [8].

В общем случае система прогнозирования состояния включает в себя информационную, техническую и информационно-математическую составляющие, обеспечивающие ее работу. Структурная схема прогнозирования состояния электротехнического оборудования показана на рисунке 16.

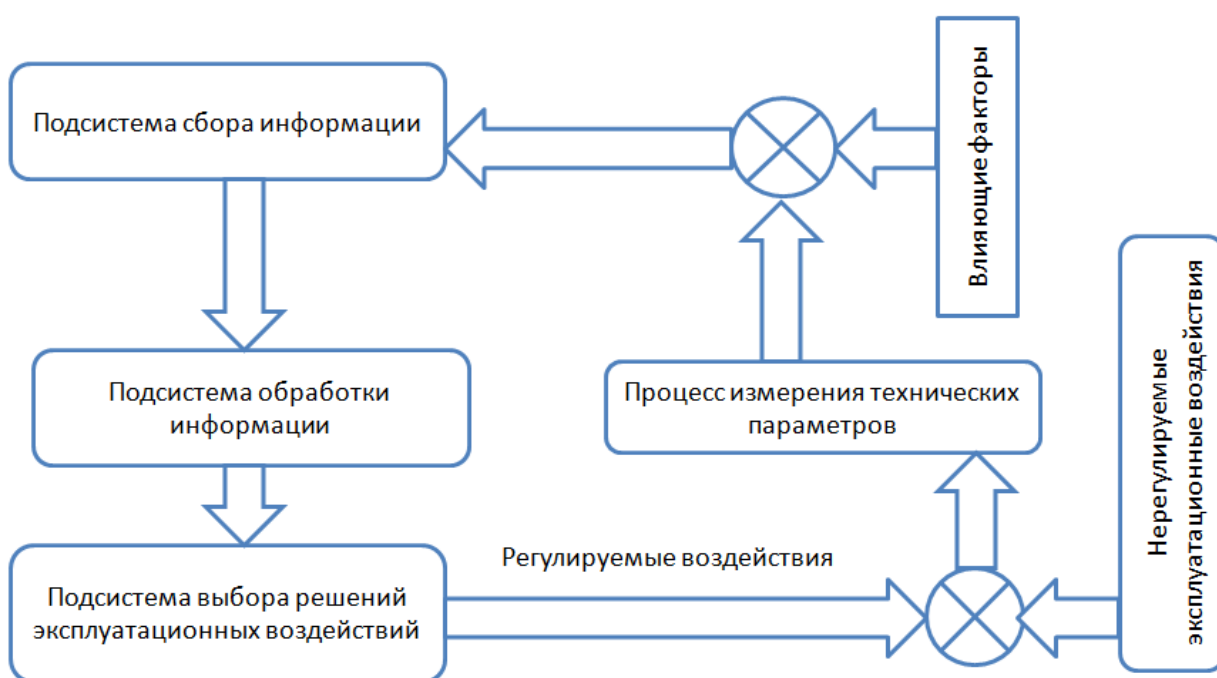


Рисунок 16 – Структурная схема системы прогнозирования состояния электротехнического оборудования

«Наибольшее распространение получили структурные методы расчета надежности. Расчет показателей надежности при помощи структурных методов включает:

- представление объекта в виде структурной схемы;
- описание схемы с помощью адекватной математической модели» [15].

«В качестве структурных схем могут рассматриваться: блок-схемы надежности; деревья отказов; графы состояний» [15].

Для оценки величин вероятности восприятия тепловизионной диагностики электротехнического оборудования и ограждающих конструкций расчетным методом установлены коэффициенты для пересчета вероятности восприятия, чувствительным элементом. Согласно исследованиям Джонсона [4], диапазон значений критерия N в зависимости от типа решаемой задачи составляет: режим «обнаружения» $N = 2 (+1 - 0.5)$ штрихов на высоту участка; режим «опознавания» $N = 8 (+1.6 - 1.4)$ штрихов или полупериодов эквивалентной миры на минимальный размер участка.

Величина критерия N определяет количество периодов эквивалентной миры, разрешаемых наблюдателем для данного уровня восприятия с 50%-ной вероятностью. Из вышесказанного следует, что для идентификации объекта с вероятностью 0.95 необходимо, чтобы на его критическом (минимальном) размере уложилось $8 \times 2 = 16$ периодов эквивалентной миры. В обычной практике (с целью упрощения оценки эффективности применения тепловизора для решения задач обнаружения и опознавания) период эквивалентной миры, состоящей из двух штрихов, для простоты оценок заменяется двумя пикселями, тем самым принимается различие объекта с вероятностью 50% при 8 пикселях на термограмме, размещенных на минимальном размере обследуемого участка. Мгновенное поле зрения в этом случае определяет расстояние, на котором критический размер объекта попадет на требуемое число пикселей для обеспечения обнаружения, распознавания и идентификации. Это обстоятельство отражено в актуализированной редакции ГОСТ 26629- 85 по тепловизионному контролю [23], где рекомендуется процедура выбора удаленности точки съемки L , m (расстояния до объекта), исходя из величины наименьшего линейного размера. Например, при проведении диагностики контактных соединений удаленность точки съемки не должна превышать 30-40 метров [23].

«Расчет надежности в рамках структурных методов чаще всего производится с помощью блок-схем надежности. Такая модель представляет взаимосвязи между компонентами с точки зрения надежности и не всегда соответствует реальному соединению элементов» [15]. Схема алгоритма приведена на рисунке 17.

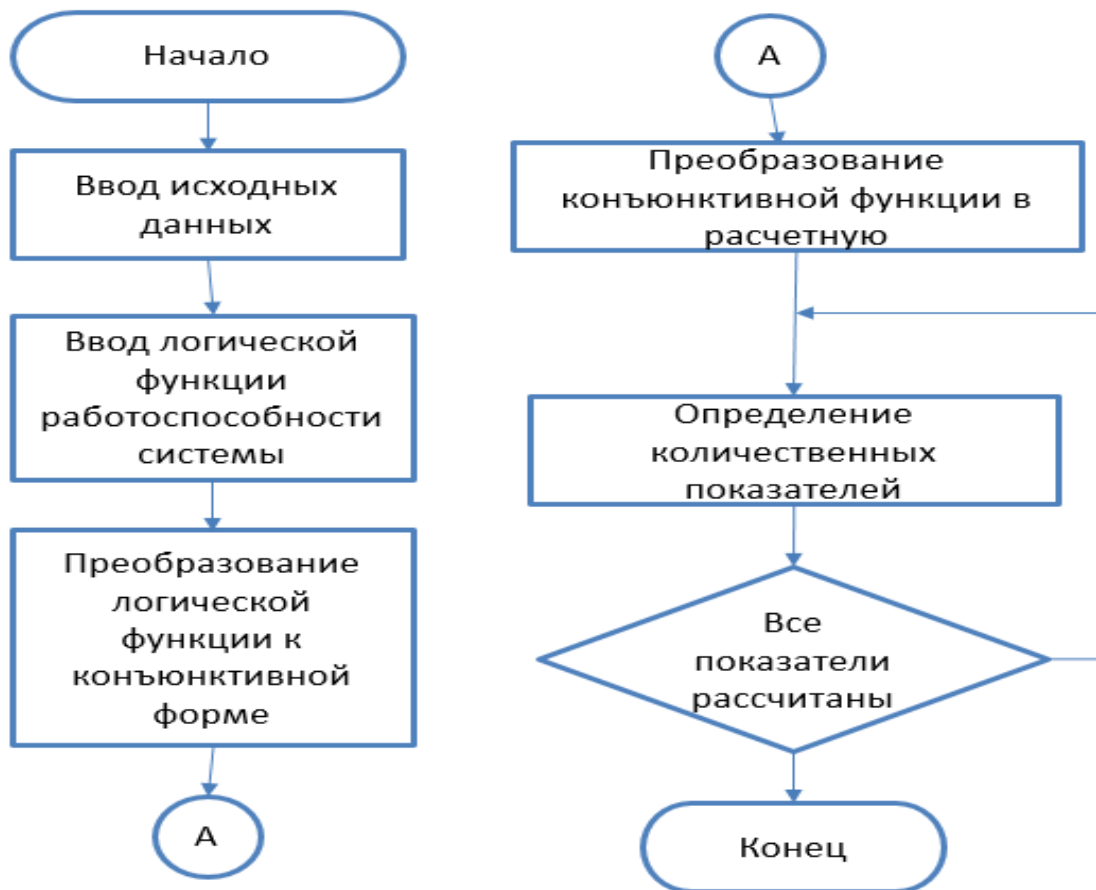


Рисунок 17 – Схема алгоритма логико-вероятностного метода прогнозирования состояния электротехнического оборудования

«Для решения задачи прогнозирования надежности электротехнического оборудования будем использовать логико-вероятностный метод» [15]. «Причины выбора данного метода — «удобное описание логической функции системы любой структуры с использованием

средств математического аппарата бинарной алгебры логики и простая, в сравнении с другими структурными методами, программная реализация» [3].

Блок схема формирования прогноза о надежности системы и ее взаимосвязь с тепловизионной диагностикой согласно [16,18,22] показаны на рисунке 18.



Рисунок 18 – Схема алгоритма формирования прогноза о надежности системы

Задачей системы прогнозирования состояния электротехнического оборудования тепловыми методами является обеспечение требуемого технического состояния, требуемой надежности элементов такого оборудования в течение срока эксплуатации при протекании в нем процессов термической деструкции на основании периодической оценки соответствия текущих значений критериев состояния обусловленными различными факторами. В некоторых случаях критерии оценки показателя предельного состояния электротехнического оборудования определяются по конструкторской документации.

Для примера приведем расчет остаточного ресурса сухого трансформатора (до окончательного вывода из эксплуатации). Остаточный ресурс определяется старением изоляции. «Старение изоляции вызывает снижение значения напряжения пробоя изоляции. При этом скорость старения существенным образом зависит от температуры. В качестве критерия оценки остаточного ресурса выбраны показатели температурного режима работы. Максимальная температура обмоток трансформаторов (класс изоляции всех обследованных трансформаторов – F) составляет 155 °С. Температура обмоток трансформаторов в рабочем режиме не превышает 42 °С (по результатам тепловизионного контроля)» [13]. Остаточный ресурс $L_{ост}$ вычисляют по формуле:

$$L_{ост} = T_{сл} - K_{исп}(G_{тек} - G_{вв}) = 25 - 0,267(2023 - 2013) = 22,3, \quad (13)$$

где $K_{исп}$ – коэффициент использования определяемый по формуле:

$$K_{исп} = 2 \cdot \left(\frac{t_{эксп} - T_{max}}{t_{эксп} \Delta T} \right) = 2 \cdot \left(\frac{42 - 155}{42 \cdot 20} \right) = 0,267, \quad (14)$$

где $T_{сл} = 25$ лет – установленный срок службы;

$t_{\text{эксп}} = 42^{\circ}\text{C}$ – температура обмоток при эксплуатации;

$T_{\text{max}} = 155^{\circ}\text{C}$ – температура максимальная для изоляции класса F;

$\Delta T = 20$ – разница температур, при которой ресурс уменьшается вдвое;

$G_{\text{тек}}$ – текущий год эксплуатации (для расчета принят 2023 г.);

$G_{\text{вв}}$ – год ввода в эксплуатацию (для расчета принят 2013 г.);

Таким образом на момент проведения тепловизионной диагностики остаточный ресурс трансформатора по критерию старения изоляции составляет 22,3 года, что приводит общий ресурс трансформатора к показателю 33,3 года.

«Проведя анализ методов решения задач прогнозирования надежности систем электротехнического оборудования принимаем логико-вероятностный метод прогнозирования надежности» [15] электротехнического оборудования так как, он является применимым к любой схеме при любых распределениях наработки на отказ. С точки зрения применения в условиях планово-технологических служб производства, обладает не сложной реализацией на автоматизированных рабочих местах. Вместе с тем, следует отметить, что производство расчетов для нужд организации технического ремонта и обслуживания по техническому состоянию, без применения специализированных программ, является трудоемким и нецелесообразным.

«Несмотря на все недостатки, логико-вероятностный метод является эффективным методом анализа надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике, поскольку он позволяет анализировать надежность любой структурно-сложной технической системы» [15].

Для облегчения организации составляющих структурной схемы прогнозирования электротехнического оборудования рекомендуется

дополнять стандартные формы, электронных эксплуатационных дел, в составе эксплуатационной документации, следующими данными:

- «Показатели надежности:
- Нарботка на отказ, ч;
- Назначенный ресурс до капитального ремонта, ч;
- Назначенный срок службы, годы;
- Критерии отказов;
- Критерий предельного состояния;
- Условия эксплуатации» [13].

Электронное эксплуатационное дело занимает ведущую роль в подсистеме сбора информации и содержит информацию, позволяющую выполнить оценку по алгоритму формирования прогноза надежности электротехнического оборудования.

Выводы по второму разделу:

- Рассмотрен Типовой алгоритм тепловизионной диагностики электротехнического оборудования. Выполнен анализ организации системы тепловизионной диагностики электротехнического оборудования при техническом обслуживании, который позволил сложить организационную систему тепловизионной диагностики электротехнического оборудования по функциям и функциональным подсистемам.
- Определены три функциональные подсистемы направленные на повышение эффективности технического обслуживания и образование стимулов для предоставления реальной информации о состоянии электротехнического оборудования.
- На основании анализа системы прогнозирования состояния электротехнического оборудования с целью определения его остаточного ресурса сформирована структурная схема прогнозирования состояния электротехнического оборудования.

- Определена основная проблема, существующая при создании современных систем прогнозирования технического состояния электротехнического оборудования, которой является сложный математический аппарат, учитывающий сложные функциональные зависимости работы моделей элементов электротехнического оборудования и требования руководящих документов и инструкций.
- Установлено, что модели элементов электротехнического оборудования могут использоваться как обычные, описываемые простыми физическими закономерностями, так и мощных законов теории вероятности и статистики, например, таких как теорема или метод Байеса. Такие системы прогнозирования уже существуют и функционируют в крупных энергетических компаниях.
- Рекомендуется включить функции тепловизионной диагностики в зону ответственности технической инспекции либо аналогичной штатной структуры в составе эксплуатирующей службы.

Методики и нормативные документы, для оценки экономических эффектов от применения тепловизионного контроля электрооборудования, не разрабатывается и не утверждается, так как зачастую такой вид контроля является инструментом проведения энергоаудита. Следовательно, финансовый анализ затрат на оснащение и содержание группы тепловизионного контроля следует рассматривать в свете инвестиционных проектов, с адаптацией к специфике предприятия, или так называемой количественной оценке аварийных ситуаций и их последствий.

3 Расчет экономической эффективности оценки технического состояния электрооборудования с помощью тепловизионных обследований

3.1 Понятие экономической эффективности инвестиций в мероприятия по оценке состояния электротехнического оборудования

«Вложения капитала в мероприятия по повышению эффективности с целью получения экономического результата называются инвестициями» [29]. Вложение инвестиций предполагает выбор варианта, который удовлетворяет основным критериям оценки эксплуатационных затрат [25], с точки зрения выполнения основных функций электрооборудования.

Для выражения финансовой части прибыли процесса эксплуатации электрооборудования, показанного на рисунке 19.

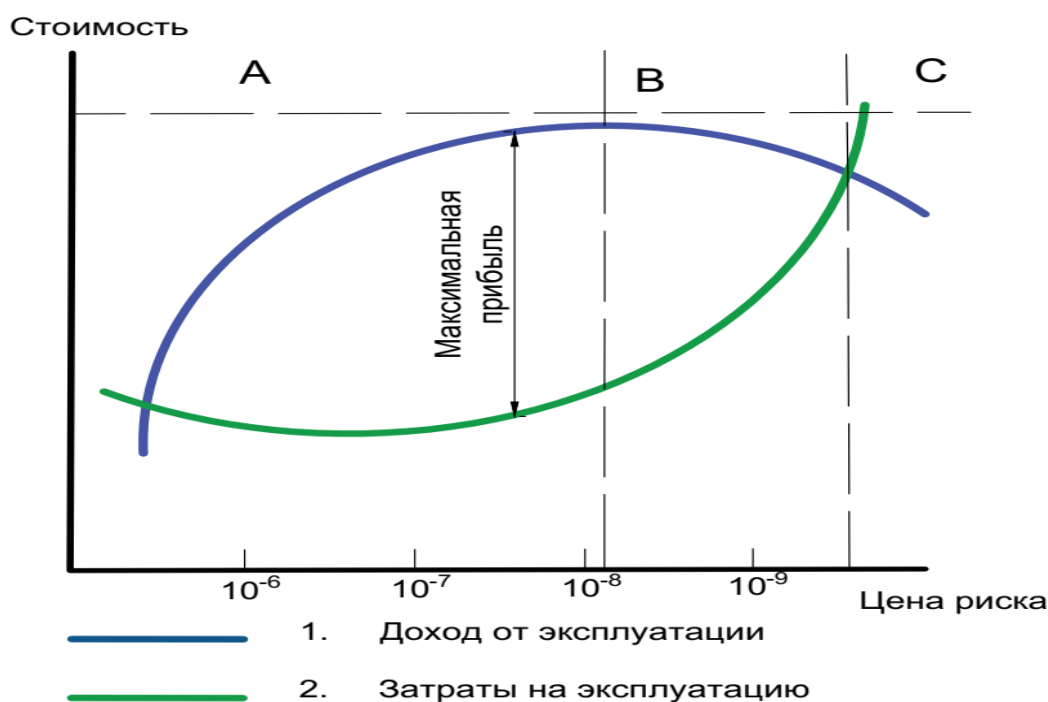


Рисунок 19 – Экономическая эффективность инвестиций

На рисунке 19 отображен график (кривая 1) доходов от эксплуатации электротехнического оборудования, который растет в интервале «А», что объясняется высокой надежностью и малым интервалом времени на ликвидацию экономических последствий отказов. График (кривая 2) показывающий дополнительные эксплуатационные затраты, так же показывает рост по мере уменьшения надежности электрооборудования, в процессе получения прибыли. В интервалах «В» и «С» прибыль заметно сокращается и даже возможны убытки, в том числе связанные с человеческими жизнями. Реализация технических мероприятий, по оптимизации эксплуатационных затрат, на каждом этапе жизненного цикла оборудования, характеризуется разницей доходов и расходов денежных средств.

Статистические данные и опыт эксплуатации показывает, что интервал «А» имеет временную протяженность 10-15 лет, следовательно, проведение экономически эффективных мероприятий в интервалах «В» и «С» возможно только на основе тщательного анализа, в котором результаты тепловизионного обследования играют ключевую роль. Так, например, «В отчете компаний группы «Россети» за 2018-2020гг указано количество технологических нарушений по причине истощения ресурса и иных причин, связанных с некачественным техническим обслуживанием составило порядка 27% от общего числа всех нарушений» [29]. До 2018 года количество технологических нарушений только по причине истощения ресурса составляло 24%.

В 2020 году введен в опытно-промышленную эксплуатацию программно-аппаратный комплекс визуального осмотра и наблюдения за состоянием электрооборудования подстанций в ПАО «Россети», одной из подсистем которого является модуль тепловизионного контроля электротехнического оборудования. Эффекты от внедрения данного комплекса, показаны на рисунке 20 и рисунке 21, в зависимости от методов их достижения они подразделяются:

- технико-экономические эффекты;
- энерго-ресурсосберегающие эффекты;
- организационно-экономические эффекты;
- социально-экономические эффекты.

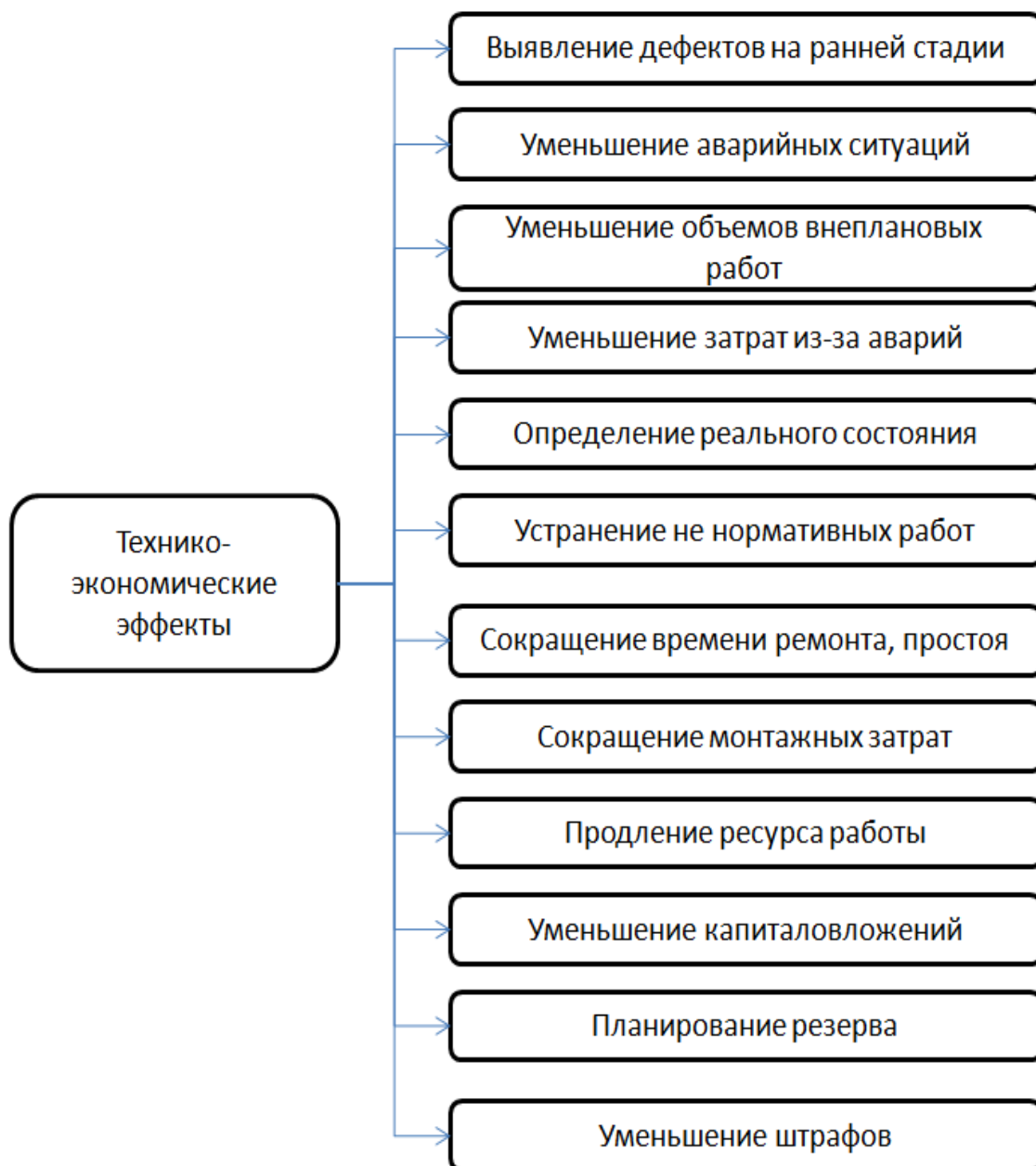


Рисунок 20 – Технико-экономическая эффективность программно-аппаратного комплекса визуального осмотра и наблюдения за состоянием электрооборудования подстанций

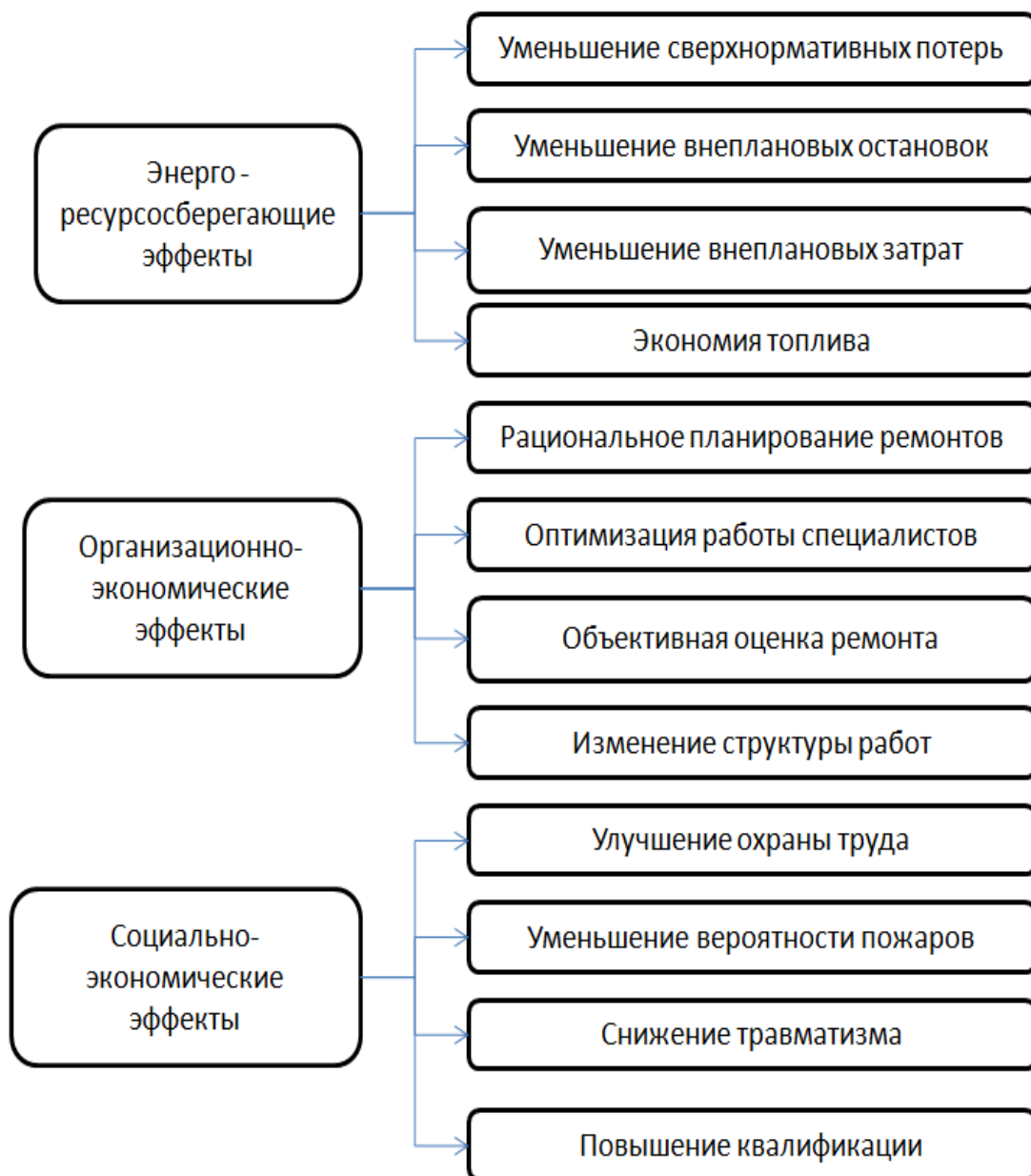


Рисунок 21 – Организационно-экономическая эффективность программно-аппаратного комплекса визуального осмотра и наблюдения за состоянием электрооборудования

На основании анализа повреждаемости и условной оценки фактического состояния электрооборудования в крупных электросетевых компаниях, на рисунке 22 показано распределение экономических эффектов в зависимости от условной вероятности повреждений электрооборудования.

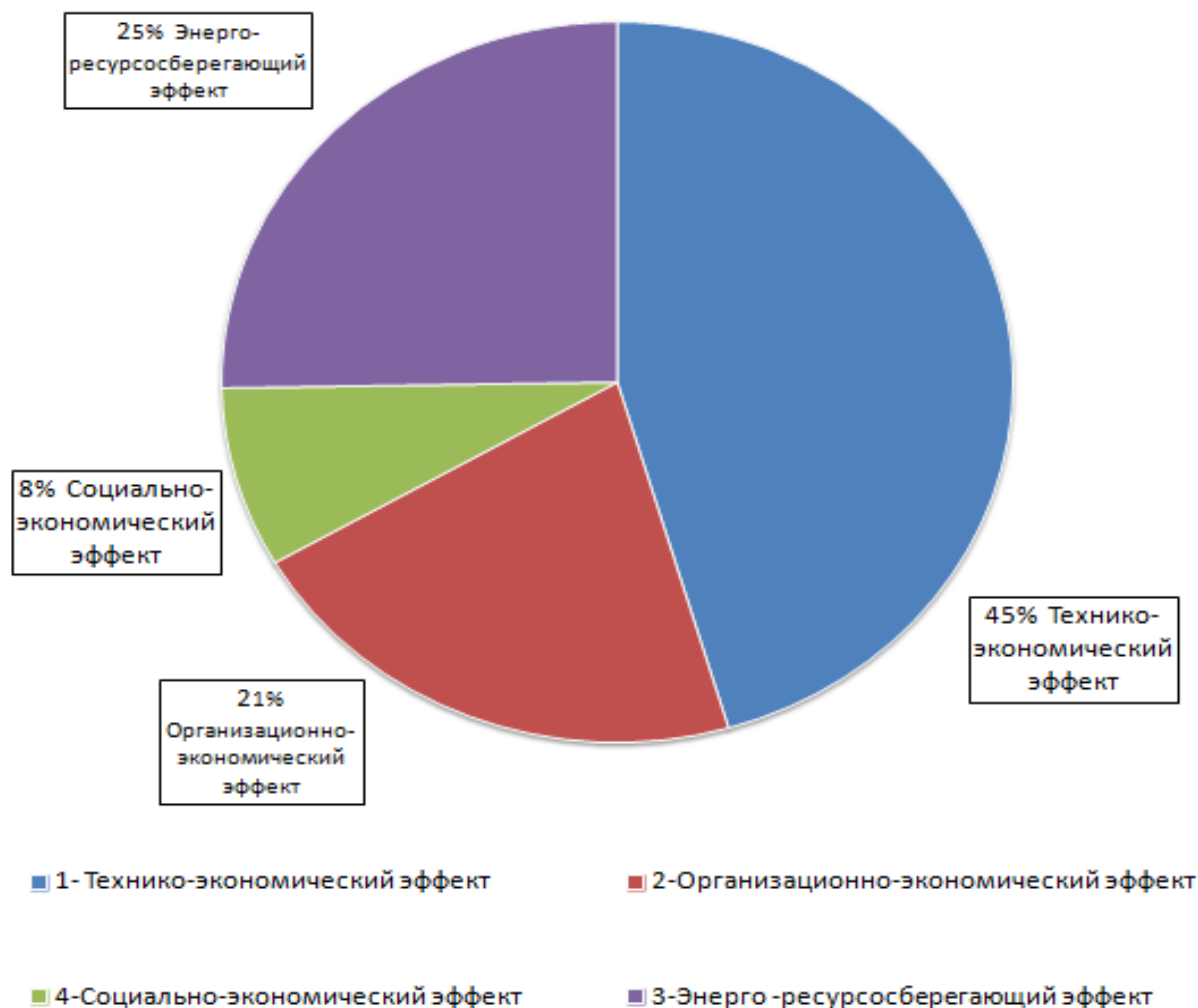


Рисунок 22 – Распределение по видам экономических эффектов оценки технического состояния электрооборудования

Если значение функции условной вероятности повреждения электрооборудования $R_{пэ}$, в качестве целевой задачи принять за ноль во время безотказной работы $T_{сс}$, величина которого должна быть как можно ближе к сроку службы данного оборудования, то значения экономических эффектов указанных на рисунке 19 находятся в границах этих величин, характеризующие границы осуществимости условной вероятности повреждения электрооборудования.

Величиной, которая является более удобной для определения экономических эффектов, является условная вероятность $Q_{пэ}$ возникновения указанных на рисунке 19 характеристик при повреждениях

электрооборудования с последующей их финансовой оценкой и определением ожидаемого риска.

На сегодняшний день разработаны математические модели электрооборудования и используются универсальные алгоритмы для определения функций распределения отказов электрооборудования, требующие большой базы статистических данных и большого количества допущений.

При нормальном законе распределения условная вероятность $Q_{пэ}$ повреждений электрооборудования определяется как

$$Q_{пэ} = 0.5 + \Phi_0 \left[\frac{m - \frac{m^*}{n}}{\sqrt{\delta^* + \frac{\delta^{*2}}{n^2}}} \right], \quad (15)$$

где Φ_0 – табулированная функция Лапласа.

Для практического использования, при отсутствии статистических данных тепловизионного контроля, условную вероятность $Q_{пэ}$ повреждений электрооборудования следует определять по формуле

$$Q_{пэ} = 1 - \sqrt[N]{1 - \delta} \quad (16)$$

где δ – коэффициент доверия, N- количество контролируемых элементов.

Ожидаемый риск определяется, как произведение максимально возможного ущерба и вероятности повреждения электрооборудования

$$R = cQ_{пэ} \quad (17)$$

где c – максимально возможный ущерб.

Например, задавая коэффициент доверия 0,9 и максимально возможный ущерб равный $c = 10^7$ рублей на 300 контролируемых элементов электрооборудования подстанции, ожидаемый риск составит:

$$R = 10^7(1 - \sqrt[300]{1 - 0,9}) = 10^7 0,00764 = 76459 \text{ рублей.} \quad (18)$$

То есть средняя величина ущерба составляет 76459 рублей, тогда как предельное значение ущерба возможно больше на два порядка.

В случае с предельной величиной ущерба доля технико-экономической составляющей является значительной и инвестиции на содержание и комплектацию подразделения тепловизионного контроля считаются малозатратными и быстрокупаемыми.

Таким образом, расчет экономической эффективности оценки технического состояния электрооборудования с помощью тепловизионных обследований сводится к расчету возможного ущерба, возникающего при отсутствии должного внимания к результатам обследования электрооборудования. Экономическая оценка может производиться на этапе разработки технико-экономического обоснования мероприятий по оптимизации эксплуатационных затрат.

В России начиная с 2017 года, определен постепенный переход на организацию ремонтов электрооборудования с учетом рисков. Критерий оптимальности, исходя из требований надежности, позволяет привлекать ограниченные материально-инвестиционные ресурсы, для сведения рисков к минимуму.

Таким образом, вместо жестко регламентированных, плановых ремонтов появляется выбор мер технического воздействия на работу электрооборудования в зависимости от приоритетов и степени рисков от воздействия отказов данного электрооборудования.

3.2 Методика проведения планово-предупредительных ремонтов по состоянию электрооборудования.

Принцип планово-предупредительных ремонтов по состоянию электрооборудования сформулирован в постановлении Приказе Министерства энергетики РФ №129 как: «определение оптимального вида, состава и стоимости технического воздействия на основании фактических и прогнозных значений индекса технического состояния и оценок уровней технического риска» [20]. Так же в принцип включены ремонтные и инвестиционные воздействия, на основании фактического или прогнозируемого состояния электрооборудования.

Суть планово-предупредительных ремонтов по состоянию, показана на рисунке 23 и в снижении риска отказов, либо предотвращенных расходов, по отношению к регламентированной, производителями электрооборудования системе плановых ремонтов.

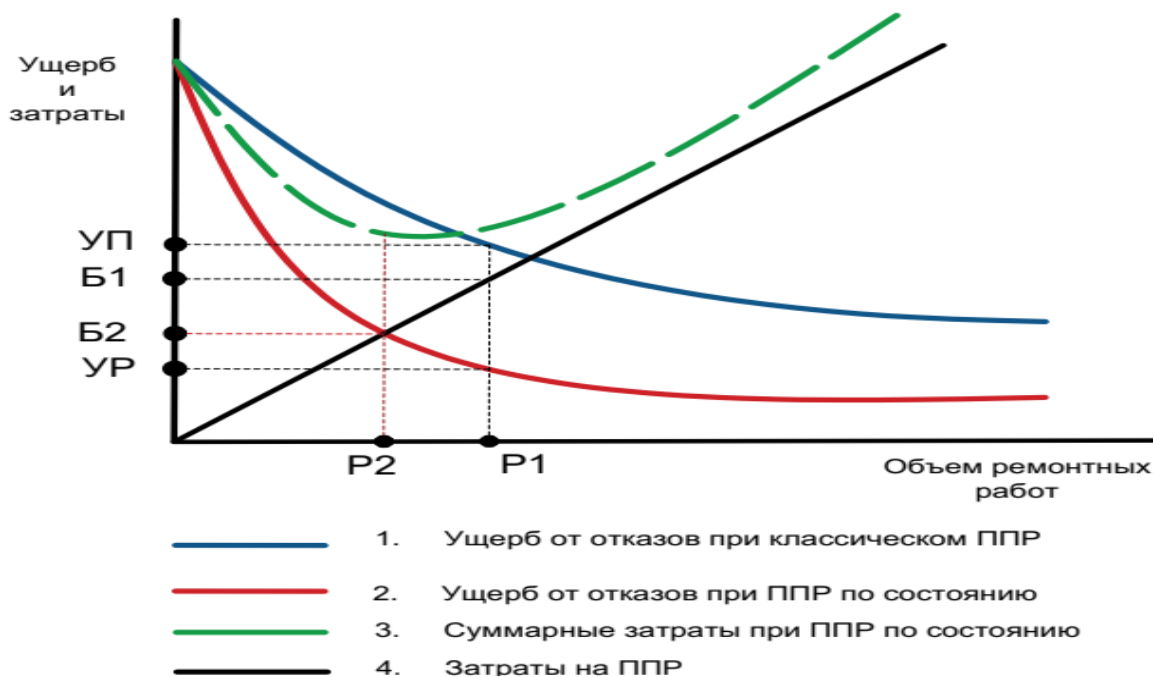


Рисунок 23 – Сравнение затрат классического ППР и ППР по состоянию

В рамках ежегодного бюджета проведения ремонтов задаем величину затрат на его выполнение, эта величина обозначается точка Б1. Точка пересечения нормалей от затрат на проведение ППР к соответствующим зависимостям ущербов дает на оси ординат величины ущерба в следствие отказов соответственно, точки УП и УР. «Кривая ущерба при ремонтах по состоянию, имеет большую крутизну на начальном участке. Это связано с тем, что в рамках ремонтах по состоянию, осуществляется ранжирование оборудования и работ по уровню риска, а имеющийся объем ресурсов в первую очередь расходуется на предупреждение отказов с наибольшим риском» [12].

При планировании ремонта электрооборудования по состоянию можно найти некую точку Б2, в которой будет удобоваримый риск при минимальных затратах и оптимальных объемах работ Р2, при которых во временной протяженности А жизненного цикла оборудования будет соответствовать максимальной прибыли от его эксплуатации.

Приказом Минэнерго РФ от 26.07.2017 №676 утверждена «Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей» [19].

В область применения методики электрооборудования не входит оборудование сетей напряжением 0,4-10 кВ, хотя такая методика была бы более всего востребована. Ремонт по состоянию в этом случае, может составить до 90% общего объема протяженности сетей класса напряжения 0,4-10 кВ.

Согласно руководящим указаниям индекс «технического состояния применяется при формировании и актуализации перспективных (многолетних) графиков ремонта, годовой ремонтной программы, комплекса мероприятий по техническому перевооружению и реконструкции» [19].

Для управления внеочередными или внеплановыми видами ремонта индекс технического состояния неприменим.

3.3 Расчет экономической эффективности оценки технического состояния электрооборудования с помощью тепловизионных обследований

Техническое обслуживание электрооборудования является сложной многоуровневой системой, в котором, тепловизионное обследование является важной частью комплекса профилактических обследований и испытаний, направленных на предупреждение и сокращение технологических нарушений в работе электрооборудования. Данные получаемые по результатам анализа тепловизионных обследований учитываются при формировании программ модернизаций и ремонтов, требующих инвестиций. При этом необходимо разделить коммерческую эффективность от системной, позволяющей учитывать инвестиционные затраты в тарифе для потребителей электрической энергии. Таким образом, достижением системного эффекта можно оценить экономическую эффективность проведения тепловизионных обследований. Анализируя эталоны технико-экономических обоснований крупных электросетевых компаний, можно сформулировать задачи расчета экономической эффективности:

- первая задача: оценка надежности и риска для электроснабжения каждого потребителя или определение математического ожидания недоотпуска электроэнергии потребителям;
- вторая задача: оценка надежности и риска электроснабжения каждого потребителя в условиях ограниченного электроснабжения и дефицита мощности;

Оценка системной экономической эффективности ведется по удельной стоимости ущербов. На удельную стоимость ущербов существенное влияние оказывает качество устранения отказа электрооборудования, которое в свою очередь характеризуется временными интервалами обнаружение отказа: подготовка его устранения, длительностью устранения, опробование, включение в работу.

Преобразуем реальную схему распределения электроэнергии в логическую схему функциональной целостности.

«Расчетная функциональная схема, показанная на рисунке 24, включает семнадцать элементов электрических сетей: районные подстанции - ПС1, ПС2, ПС3, распределительные сети с трансформаторными подстанциями ПС4, ТП1, ТП2, ТП3, ТП4. К шинам электрических сетей» [21] присоединены потребители, обозначенные буквами от «А» до «J».

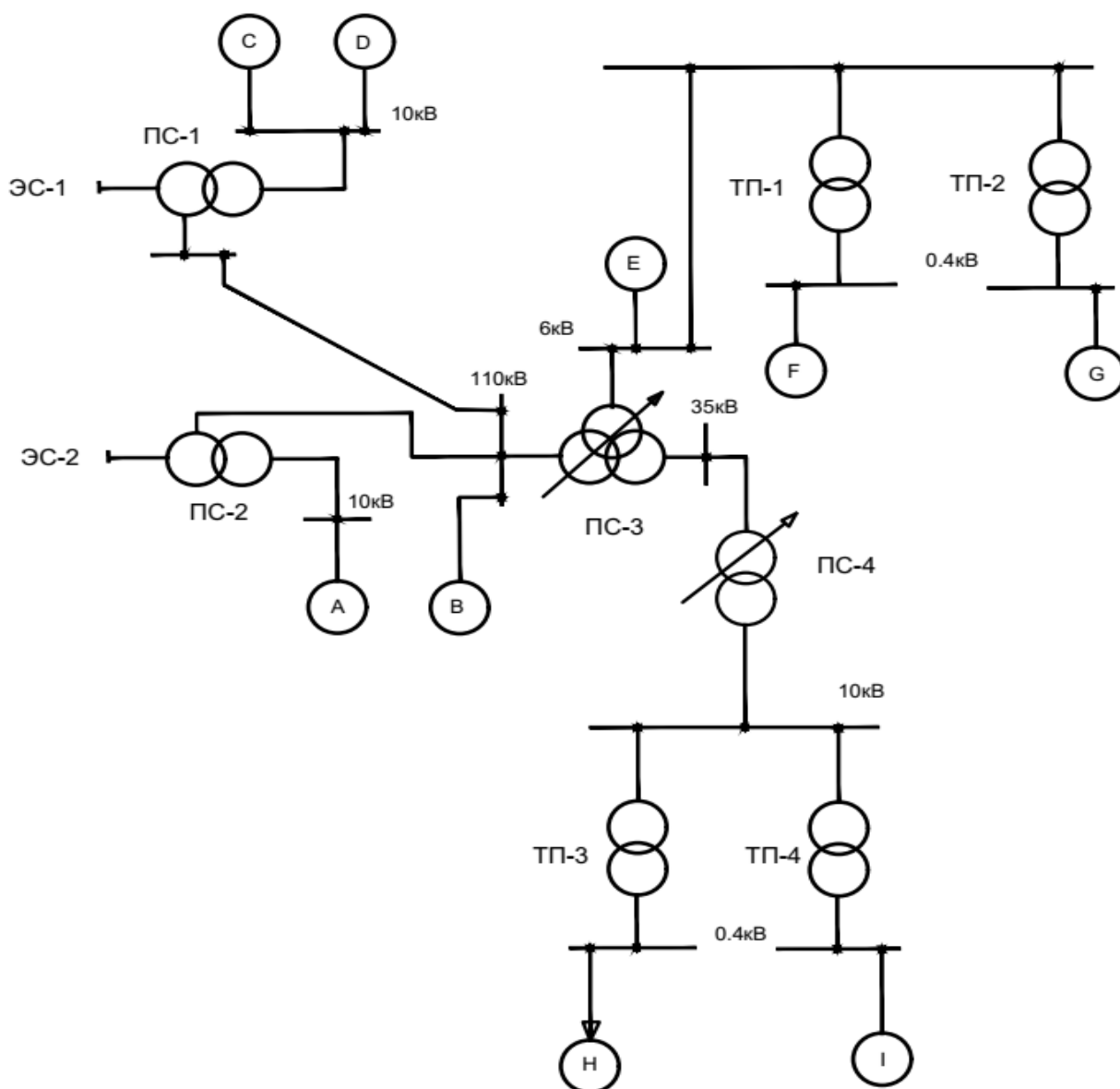


Рисунок 24 – Расчетная функциональная схема электрической сети

Схема функциональной целостности сети приведена на рисунке 25, вершинами схемы функциональной целостности являются подстанции, шины, потребители.

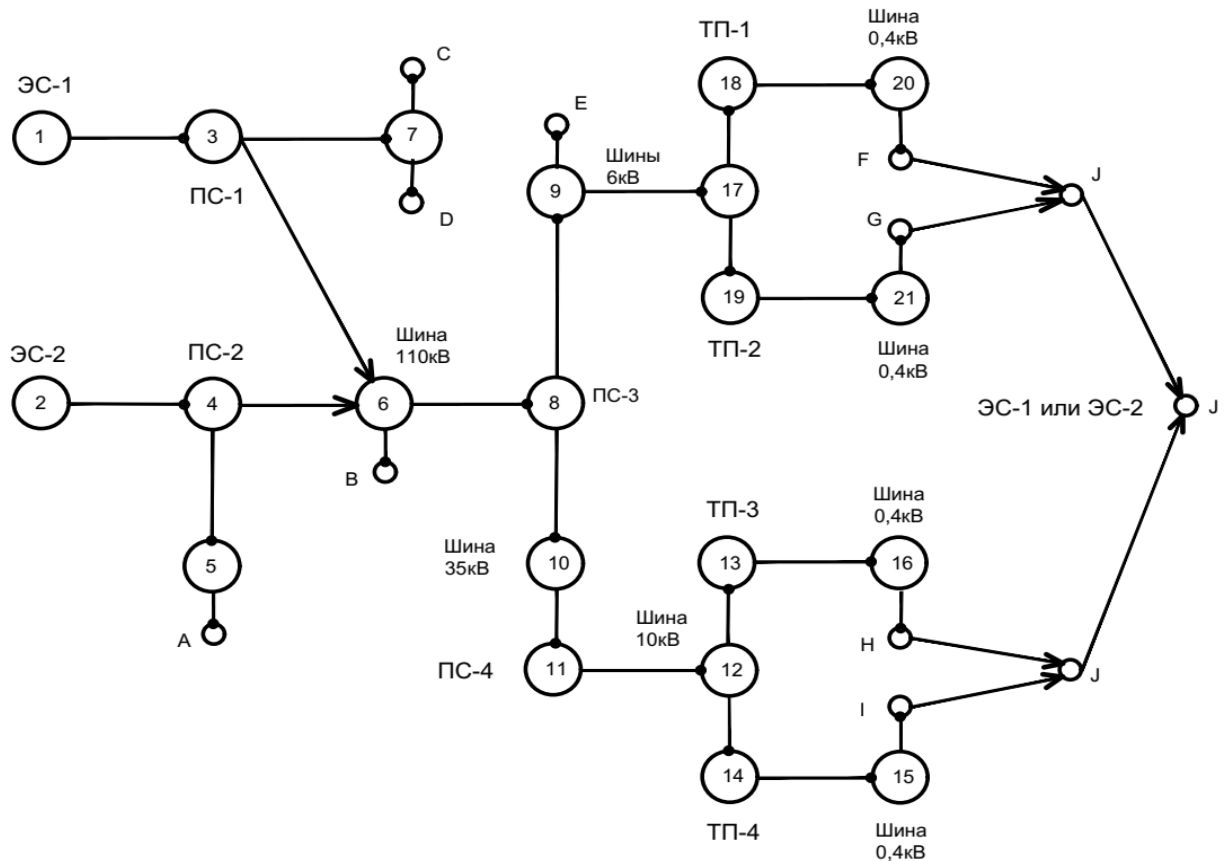


Рисунок 25 – Схема функциональной целостности электрической сети

Данные для расчёта системных показателей надёжности приведены в таблице 12.

Таблица 12– Показатели надёжности элементов схемы функциональной целостности электрической сети

Номер элемента в схеме	Наименование элемента	Среднее время наработки на отказ, год	Среднее время восстановления, ч
X-1	ЭС1	0,8	200
X-2	ЭС2	1,5	200
X-3	ПС6	12,5	700

Продолжение таблицы 12

Номер элемента в схеме	Наименование элемента	Среднее время наработки на отказ, год	Среднее время восстановления, ч
X-4	ПС5	12,5	700
X-5	ЦП 10 кВ	33	7
X-6	Шина 110 кВ	33	7
X-4	ПС5	12,5	700
X-7	ЦП 10 кВ	100	2
X-8	ПС7	14	525
X-9	Шина 6 кВ	33	7
X-10	Шина 35 кВ	100	2
X-11	ПС8	20	400
X-12	Шина 10 кВ	33	7
X-13	ТПЗ	25	200
X-14	ТП4	25	200
X-15	Шина 0,4 кВ	100	5
X-16	Шина 0,4 кВ	100	5
X-17	Шина 6 кВ	25	9
X-18	ТП 1	25	400
X-19	ТП 2	25	400
X-20	Шина 0,4 кВ	50	4
X-21	Шина 10 кВ	50	4,5
X-22	Шина 0,4 кВ	50	4

Определим показатели риска для элементов схемы функциональной целостности электрической сети и результаты вычислений сведем в таблицу 13.

Коэффициент неготовности системы по отношению к i -му потребителю, K_n определяется по формуле как:

$$K_n = \frac{T_{cc}}{T_{cc} + T_B}, \quad (19)$$

где T_{cc} – время безотказной работы элемента схемы электрической сети
 T_B – время восстановления элемента схемы электрической сети.

Таблица 13– Показатели риска для элементов схемы функциональной целостности электрической сети

Номер, i -го потребителя	Обозначение узла	Логический критерий отказа $y''j$	Коэффициент неготовности системы по отношению к i -му потребителю, K_n	Среднее время наработки системы на отказ, τ_i^{pc} , год	Среднее время восстановления системы, τ_i^{bc} , ч
1	A	$y''23$	0.007122755	3,515	220,911
2	B	$y''24$	0.007122755	3,515	220,911
3	C	$y''25$	0.000773451	5,421	36,7573
4	D	$y''26$	0.007122892	3,643	228,964
5	E	$y''27$	0.000800285	5,382	37,7607
6	F	$y''28$	0.00508354	3,478	155,665
7	G	$y''29$	0.006947305	2,58	158,138
8	H	$y''30$	0.006947305	2,58	158,138
9	I	$y''31$	0.008263492	2,515	183,609
10	J	$y''32$	0.008263492	2,515	183,609

Расчет показателей риска проводим в табличной форме.

Интенсивность потерь R_i , «равная величине ущерба за единицу времени, наносимого i -му потребителю вследствие его незапланированного отключения от электрических сетей (т.е. в результате нахождения системы в состоянии отказа – реализации критерия $y''j$); максимально возможный ущерб, R_i^{max} » [21], причиняемый i -му потребителю за год, равный произведению интенсивности потерь и длительности календарного года,

$$R_i^{max} = R_i \cdot 8760, \quad (20)$$

где R_i – «ожидаемый ущерб, (математическое ожидание ущерба) i -го потребителя за год, равный произведению коэффициента неготовности системы по соответствующему критерию $y''j$ и максимального ущерба» [21],

$$\bar{R}_i = (1 - K_{2j}^c) \cdot R_i^{max}, \quad (21)$$

где K_{zj}^c – «коэффициент готовности системы по критерию».

Ожидаемая величина ущерба, наносимого за год всем потребителям электроэнергии вследствие ненадёжности системы» [21],

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (22)$$

где N – число потребителей.

Данные расчетов вышеуказанных ущербов показаны в таблице 14.

Таблица 14– Показатели ущерба, наносимого i -му потребителю электрической сети

Номер, i -го потребителя	Обозначение узла	R_i , руб./кВт·ч	R_i^{\max} , руб.	\bar{R}_i , руб.
1	A	720	6307200	44924,6403
2	B	1800	15768000	112311,601
3	C	720	6307200	4878,31015
4	D	720	6307200	44925,5044
5	E	360	3153600	2523,77878
6	F	360	3153600	16031,4517
7	G	72	630720	4381,80421
8	H	72	630720	4381,80421
9	I	72	630720	5211,94967
10	J	720	6307200	52119,4967
$\bar{R} = \sum_{i=1}^n R_i$,				291690

Таким образом, суммарный ожидаемый ущерб, причиняемый потребителям за год, составил 291690 рублей, при условии неограниченной мощности источников электроснабжения, которые в свою очередь вносят основной вклад в величину среднего ущерба потребителям.

В условиях ограниченного электроснабжения суммарный ущерб, причиняемый потребителям в течение года в три раза выше ущерба при неограниченном электроснабжении.

При этом следует учесть, что не каждый перерыв в снабжении электроэнергией может причинить ущерб производству, для более глубокого

анализа необходимо ввести поправочные коэффициенты, зависящие от глубины ограничения мощности конкретной отрасли промышленности.

Анализируя данные расчетов по удельной величине ущерба можно сказать о том, что его величина соответствует средневзвешенным значениям удельного ущерба в странах Западной Европы и согласно опубликованным данным [19] составляет 9,53 у.е/кВтч, тогда как по рекомендованные значения для оценочного анализа при проектировании в отечественной практике составляют 1,5-4 у.е/кВтч. Следовательно, для практического применения в технико-экономических расчетах необходимо использовать данные получаемые на основании расчетов, при помощи специализированных программных комплексов.

Выводы по третьему разделу:

- Рассмотрено современное понимание оценки экономической эффективности в зависимости от вложений капитала для реализации технических мероприятий, по минимизации эксплуатационных затрат.
- Проведен структурный анализ по видам экономических эффектов. Выявлено, что доля энерго-ресурсосберегающего эффекта и организационно-экономического практически близка к технико-экономическому.
- Показано, что условная вероятность повреждений электротехнического оборудования при нормальном законе распределения вероятностей работоспособности и ее финансовая оценка, в первом приближении обеспечивают экономическую целесообразность инвестиций для формирования группы тепловизионного контроля.
- Выполнены расчеты удельной величины ущерба, причиняемого потребителям электрической энергии, в сравнении со средневзвешенными значениями этого параметра в странах Западной Европы.

Заключение

«Проблемы диагностики электрооборудования в последнее время приобретают все большую актуальность по целому ряду причин. Прежде всего за последнее десятилетие произошел резкий рост доли оборудования, отработавшего нормативный срок службы. В России доля такого оборудования уже к 2020 году составляет более половины всех установленных мощностей.

Анализ показывает, что уже при низкой нагрузке дефекты являются потенциально опасными; при перерасчете превышения температуры дефектов на значения токов, соответствующих 50% (или тем более 100%) нагрузке, аварийными (критическими) следует признать до 10 % обнаруживаемых дефектов.

В результате перехода к рыночным отношениям и недофинансирования в течение ряда лет в необходимых объемах проведения планово-профилактических работ снизилось качество и надежность энергоснабжения и значительно увеличилась повреждаемость электрооборудования. В частности, в энергосистемах России такое положение характерно для трансформаторов на подстанциях 35-750 кВ, являющихся одним из их важнейших элементов, определяющих надежность электроснабжения» [10]. «Постоянно действующими факторами экономики являются хроническая недостаточность средств на проведение технического обслуживания и потери квалифицированных кадров служб главного энергетика. Все это ставит проблему оценки состояния и прогнозирования работоспособности и остаточного ресурса на одно из первых мест в системе обслуживания. Хотя нельзя не отметить, что это приводит к разработке методов и систем диагностики, которые, при практическом применении позволяют контролировать состояние оборудования в процессе эксплуатации» [10]. Применение методов не параметрических методов анализа позволяет специалистам, которые несут ответственность за безопасную и безаварийную

эксплуатацию электротехнического оборудования, избегать рисков аварий на вверенном оборудовании и обеспечивать заданный уровень безопасности сооружения в целом.

Дистанционные бесконтактные методы диагностики состояния электротехнического оборудования являются востребованными, в силу их относительно не высокой трудоемкости и практически полной безопасности.

Подразделение тепловизионной диагностики в зависимости от штатной структуры предприятия могут выполнять функциональные операции, как в составе подразделения предприятия, так и в качестве прикомандированного персонала. В данной работе рассмотрены критерии оценки состояния электротехнического оборудования. Показано, что вид технического воздействия зависит от индекса технического состояния и средней разнице температур, полученной при тепловизионном обследовании, с учетом факторов влияющих на достоверность результатов диагностики.

Проанализирована структурная схема проведения тепловизионной диагностики электротехнического оборудования. Для составленной структурной схемы описан типовой алгоритм тепловизионной диагностики электротехнического оборудования. Рассмотрены примеры заключения об остаточном ресурсе или опасности обнаруженного дефекта.

Проведены расчеты оценки влияния факторов на показатели надежности электротехнического оборудования методом ранговой корреляции [17,18]. Расчётным путем установлено, что на мнения специалистов-экспертов существенное влияние оказывают производственные факторы, влияние которых может быть снижено при последующих анализах.

Рассмотрено применение статистических гипотез на примере соответствия критерию Пирсона. Расчетным методом установлено, что распределение дефектов за исследуемый интервал можно описать экспоненциальным законом распределения. Установлено, что использование критерия Пирсона позволяет детализировать состояние наблюдаемых единиц электротехнического оборудования.

Только создание универсальной самообучаемой, самоанализирующей системы прогнозирования состояния электротехнического оборудования, построенной на новых принципах моделирования (методов искусственного интеллекта), может привести к успешному широкому внедрению таких систем. Хорошо зарекомендовавшая себя система планово-предупредительных ремонтов должна трансформироваться в интеллектуальную систему безаварийной эксплуатации электротехнического оборудования с поэтапным отказом от практики продления эксплуатации оборудования с истекшим нормативным ресурсом.

Особенностью работы подразделений тепловизионной диагностики является то, что требуется определить остаточный срок службы электротехнического оборудования для продления сроков эксплуатации, а не для его плановой замены. Тем не менее, несмотря на особенности функционирования подразделений тепловизионного контроля в России для исключения формального и субъективного подхода к задачам, указанным выше необходимо создание автоматизированной системы прогнозирования.

Рассмотрено современное понимание оценки экономической эффективности в зависимости от вложений капитала для реализации технических мероприятий, по минимизации эксплуатационных затрат.

Проведен структурный анализ по видам экономических эффектов. Выявлено, что доля энерго-ресурсосберегающего эффекта и организационно-экономического практически близка к технико-экономическому.

Показано, что условная вероятность повреждений электротехнического оборудования при нормальном законе распределения вероятностей работоспособности и ее финансовая оценка, в первом приближении обеспечивают экономическую целесообразность инвестиций для формирования группы тепловизионного контроля.

Выполнены расчеты удельной величины ущерба, причиняемого потребителям электрической энергии, в сравнении со средневзвешенными значениями этого параметра в странах Западной Европы.

Основной проблемой при создании современных систем прогнозирования технического состояния электротехнического оборудования является математический аппарат, учитывающий сложные функциональные зависимости работы моделей элементов электротехнического оборудования и требования руководящих документов и инструкций. Модели элементов электротехнического оборудования могут использоваться как обычные, описываемые простыми физическими закономерностями, так и мощных законов теории вероятности и статистики, например, таких как теорема или метод Байеса. Такие системы прогнозирования уже существуют и функционируют в крупных энергетических компаниях.

«Использование систем интеллектуального управления на основе нейронных сетей даёт возможность комплексно решать актуальные задачи электроэнергетики в части прогнозирования, диагностики и управления компонентами электроэнергетическими системами. В перспективе нейросетевые средства могут занять ведущее положение среди компонентов математического обеспечения электроэнергетических систем, что открывает широкие возможности для исследований» [15,16].

Для применения на практике индекса технического состояния необходимо разработать и апробировать методику для функции автокорреляции работы электрооборудования с учетом мероприятий, повышающих его безотказность.

Неполнота подхода к вопросу безотказности функционирования электротехнического оборудования с точки зрения эффективности инвестиций обусловлена не только игнорированием экономических показателей, но и несовершенством критериев оценки даже энергетических показателей [5,10], так как не учитываются потери от неравновесности протекающих технологических процессов.

«В настоящее время кардинальным путем происходит снижения объемов работ и стоимости технического обслуживания электрооборудования, численности эксплуатирующего и ремонтного

персонала. Осуществляется переход от предупредительного ремонтного цикла и периодичности проведения ремонтов к обслуживанию на основе нормативов «планово-предупредительных ремонтов» [14,29]. «По результатам диагностических обследований и мониторинга электротехнического оборудования в целом и маслонаполненного трансформаторного оборудования в частности видно, как надлежащая эксплуатация электрооборудования будет осуществлена только тогда, когда техническое состояние электрооборудования будет определяться более глубоким анализом и правильным подходом к назначению периодичности и объемов технического обслуживания и ремонтов» [22,29]. И это всегда будет неотъемлемой и важной частью любой электротехнической системы.

Анализируя данные источников [24,26,27,28] констатируем, что «при переходе к системе ремонтов на основании технического состояния, качественно изменяются требования к системе диагностирования электрооборудования, при которой главной задачей диагностирования становится прогноз технического состояния на относительно длительный период. И решение таковой задачи не является неоригинальным и возможно только при комплексном подходе к совершенствованию методов» [29], средств или каких-нибудь алгоритмов и организационно-технических мероприятий диагностирования можно добиться эффективных и качественных результатов.

Экономическая эффективность функционирования любого производства во многом определяется стоимостью энергетических и сырьевых ресурсов, а также рациональным их использованием [21,23,26].

Список используемых источников

1. Афонин А. В., Таджибаев А. И., Сергеев С. С. Инфракрасная термография в энергетике. Технические средства приема инфракрасных излучений: Учебное пособие. СПб: Изд. ПЭИПК, 2000. 60 с.
2. Бажанов С. А. ИК-диагностика электрооборудования распределительных устройств // Библиотечка электротехника. М., 2000. №4(16). С. 69-78.
3. Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 2-40 с.
4. Боков Г. С. Техническое перевооружение российских электрических сетей // Новости электротехники. 2002. № 2 (14). С. 10–14.
5. Будадин О. Н., Потапов А. И., Колганов В. И., Троицкий Т. Е., Абрамова Е. В. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М: Наука, 2002. 320 с.
6. Вавилов В. П., Александров А. Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. 360 с.
7. Вдовико В. П. Методология системы диагностики электрооборудования высокого напряжения // Электричество. 2010. № 2. С. 14-20.
8. Власов А. Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики, Москва: Изд-во Колос, 2006. 279 с.
9. Власов А. Б. Прогнозирование долговечности контактных соединений по данным тепловизионной диагностики // Электротехника, 2003. №12. С.273-274.
10. Гапо Е. Г., Гужов С. В. Вопросы совершенствования и адаптации энергетических систем и комплексов к вызовам современности. М.: Изд-во МЭИ, 2021. 117 с.

11. Горбей Р. М., Чернов В. Ф., Удод Е. И. Диагностирование электрооборудования 0,4-750кВ средствами инфракрасной техники // Киев. 2007. С.–374.

12. Годовой отчет ПАО «Россети» за 2020 год [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании ПАО «РОССЕТИ» URL: https://www.rosseti.ru/investors/common/results/doc/Pril2_2021.pdf?ysclid=lcn-el6q745606324394/ (дата обращения: 20.12.2022).

13. ГОСТ Р 58341-2020 Трансформаторы силовые атомных станций. Учет фактически выработанного и оценка остаточного ресурсов. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2003. № 235. 47 с.

14. Захаров О. Г. Поиск дефектов в релейно-контакторных схемах. М: НТФ «Энергопресс», 2010. 96 с.

15. Ковалёв С. П. Применение нейронных сетей глубокого обучения в математическом обеспечении цифровых двойников электроэнергетических систем // Системы и средства информатики. 2021. Т 31, № 1. С. 133-144.

16. Коновалов Ю. В., Вайгачёв А. Е. Искусственный интеллект в электроэнергетике // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 225-226.

17. Константинов А. Г., Осотов В. Н., Осотов А. В. Тепловизионный контроль высоковольтных вентильных разрядников // Электрические станции. 1998. - №12. С. 78-85.

18. Марченко А. И. Разработка и исследование автоматики опережающего сбалансированного деления в электрических сетях с малой генерацией: дисс. канд. техн. наук. Новосибирск, 2020. 184 с.

19. Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей [Электронный ресурс]: Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 26.07.2017 № 676 (ред. От 17.03.2020). URL: <https://kodeks.stpr.ru/docs/d?nd=4560880-08&point=mark=314H3IJ00003->

2I0000NVU03OHFNP2863LD53V3D99S000003A007NGT8/ (дата обращения 23.05.2023).

20. Методические указания по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа [Электронный ресурс]: Приложение к приказу Министерства энергетики РФ от 19 февраля 2019 г. № 123 (ред. От 04.04.2019). URL: <https://kodeks.stpr.ru/docs/d?nd=542643279&point=mark=3TE9K5I3VAF3DK00C4QGV2CH9PLP2IOEQIN00003C8098LHD719FRKD4> / (дата обращения 23.05.2023).

21. Методические указания по технико-экономическому обоснованию электросетевых объектов. Эталоны обоснований – РАО «ЕЭС России». [Электронный ресурс]: Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» No СТО 56947007-29.240.01.271-2019 (ред. От 24.07.2019). URL: <https://kodeks://link/d?-nd=560916122&nh=3&page=1/> (дата обращения 23.05.2023).

22. Озерницкий И. М. и др. Новые решения в тепловизионных системах диагностики промышленного оборудования. М.: Энергетик, 2000. №11. С.23-36.

23. Папков Б. В., Илюшин П. В., Куликов А. Л. Надёжность и эффективность современного электроснабжения: Нижний-Новгород: Научно-издательский центр «XXI век», 2021 160 с.

24. Проталинский О. М. Адаптивная система прогнозирования надежности технологического оборудования объектов энергетики / О.М. Проталинский, И. А. Щербатов, А. А. Ханова, И. О. Проталинский // Информатика и системы управления. 2019. No 1 (59). С. 93-105.

25. Рогалев Н. Д., Зубкова А. Д., Мастерова И. А. и др.; под редакцией Рогалева Н. Д. Экономика энергетики М.: Издательство МЭИ, 2005. 288 с.

26. Тиходеев Н. Н. и др. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110–750кВ М.: Изд-во НТК Электропроект, 2000. 123 с.

27. Тиходеев Н. Н. и др. Руководство по защите электрических сетей 6-

1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. СПб: ПЭИПК, 1999. 326 с.

28. Федоров М. П. Доступность энергии как главный фактор устойчивого и безопасного экономического развития страны. / Федоров М. П., Огороков В. Р., Огороков Р. В. // Академия энергетики. 2012. № 2 (46). С. 48–53.

29. Хальясма А. И. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство «Урал», 2015. 64 с.

30. Ящура А. И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: справочник. М.: Энас, 2012. 230 с.

31. Bu S. J., Cho S. B. Time Series Forecasting with Multi-Headed Attention-Based Deep Learning for Residential Energy Consumption // *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 4722.

32. Grover P.E. and R.J. Seffrin. Infrared Inspection of Boilers and Process Heaters // *Materials Evaluation*. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 1991. Vol. 49, No. 10. P. 1272-1274.

33. Jin X. B., Zheng W. Z., Kong J. L., Wang X. Y., Bai Y. T., Su T. L., Lin S. Deep- Learning Forecasting Method for Electric Power Load via Attention-Based Encoder-Decoder with Bayesian Optimization // *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1596.

34. Mac Namara N. and P.A. Zayicek Evaluation of IR Technology Applied to Cooling Tower Performance // *Thermosense XXI*. SPIE Proceedings. Bellingham, WA: International Society for Optical Engineering, 1999. Vol. 3700. - P 252-267.

35. Okamoto Y. and T. Inagaki Remote Sensing Thermal Image Method // Tokyo, Japan: Corona Publisher, 1995. P. 146-173.