
На правах рукописи



АНДРЕЕВ Дмитрий Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ
РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

Специальность 05.14.02
Электростанции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2006

Работа выполнена на кафедре "Электрические станции и диагностика электрооборудования" в ГОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ)

Научный руководитель: **доктор технических наук
Назарычев Александр Николаевич**

Официальные оппоненты: **доктор технических наук, профессор
Папков Борис Васильевич**
**кандидат технических наук, доцент
Герасимов Сергей Евгеньевич**

Ведущая организация: **Магистральные электрические сети
Центра, филиал ОАО "ФСК ЕЭС"**

Защита состоится **23 июня 2006 г. в 11⁰⁰** на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: **153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ.**

Тел.: (4932) 38-57-94, факс (4932) 38-57-01,

E-mail: kafedra@esde.ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ.

Автореферат разослан 22 мая 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д 212.064.01
доктор технических наук, профессор



А.В. Мошкарин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. С развитием рыночных отношений в электроэнергетической отрасли возрастает экономическая ответственность энергетических компаний за нарушение нормального режима работы энергосистемы и снижение качества электроэнергии, поставляемой потребителю. Поэтому энергетические компании заинтересованы в обеспечении надежности работы электрооборудования. В основе такой заинтересованности лежит давление рынка, рост конкуренции, мотивация в экономии издержек и снижение уровня резервов, что влияет на надежность функционирования оборудования. Существуют три основных фактора, влияющих на надежность электрооборудования и электроэнергетики в целом. Это – рост нагрузки, износ основных фондов и либерализация электроэнергетики. Износ основных фондов в настоящее время является важнейшей проблемой энергетики, от решения которой зависит надежность ее функционирования.

Анализ старения электротехнического оборудования показывает, что степень износа основных фондов в Федеральной сетевой компании в среднем составляет 48,5 %, при этом оборудования подстанций – 70 %, зданий и сооружений – 37,8 %, воздушных линий электропередач – 40 %. В этих условиях задача поддержания на требуемом уровне показателей безотказности и долговечности электрооборудования становится более острой.

Определяющее влияние на степень износа электрооборудования оказывают эксплуатационные факторы, которые действуют в различных условиях и режимах работы. Они приводят к развитию и накоплению дефектов, к более раннему наступлению предельного состояния и отказу оборудования. При утяжеленных условиях эксплуатации скорость износа электрооборудования еще выше, чем при облегченных или нормативных условиях.

Для обеспечения безопасной и эффективной работы, при управлении режимами эксплуатации и ремонта необходимо знать фактический уровень надежности электрооборудования с учетом воздействия реальных эксплуатационных факторов. Поэтому актуальной задачей является разработка методов и математических моделей количественной оценки показателей эксплуатационной надежности, позволяющих учесть основные факторы, которые влияют на износ электрооборудования.

Актуальность работы подтверждается ее соответствием приоритетным направлениям развития науки и техники, утвержденным Председателем Правительства РФ 20.03.2002 г. и решением совета директоров ОАО РАО "ЕЭС России" № 128 от 27.09.2002 г., а также основными положениями Концепции технической политики ОАО РАО "ЕЭС России".

Цель работы и задачи исследования. Развитие теории и совершенствование методов расчета показателей эксплуатационной надежности электрооборудования с учетом условий и режимов работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий комплекс задач.

- § Проанализировать современное состояние надежности электрооборудования сетевых и генерирующих компаний.
- § Исследовать влияние на надежность электрооборудования режимов и условий эксплуатации.
- § Усовершенствовать существующие методы расчета показателей надежности электрооборудования и разработать общие математические модели определения показателей долговечности и безотказности электрооборудования различных типов и классов напряжения с учетом условий эксплуатации и воздействующих при этом факторов.
- § Разработать на основе общих моделей оценки показателей надежности частные модели для определения фактического сработанного и остаточного ресурса и вероятности безотказной работы силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей и электродвигателей.
- § Разработать модель управления режимами работы электрооборудования с учетом эксплуатационных показателей надежности.
- § Исследовать взаимосвязь показателей долговечности и безотказности электрооборудования в реальных условиях эксплуатации.
- § Определить чувствительность разработанных моделей оценки показателей надежности электрооборудования к точности исходных данных.
- § Провести серию расчетов показателей надежности по реальным исходным данным и обосновать достоверность разработанных методов и математических моделей на примере электрооборудования действующих энергообъектов.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является электротехническое оборудование электрических станций и подстанций (силовые трансформаторы, высоковольтные выключатели, электродвигатели). Предметом исследования являются методы и модели расчета показателей долговечности и безотказности электрооборудования.

Методика исследований. Для решения поставленных в работе задач использовались методы системного анализа, математического моделирования, теории вероятности и математической статистики, теории случайных процессов и экспериментально-статистического анализа надежности.

Достоверность полученных результатов. Достоверность предложенных моделей и обоснованность результатов исследования обеспечивается корректным применением теоретических методов, подтверждением полученных результатов данными других авторов, сходимостью результатов проведенных исследований и вычислительных экспериментов, а также подтверждается данными, полученными в реальных условиях эксплуатации электрооборудования и положительным опытом внедрения разработанных программ расчета показателей надежности на энергообъектах.

Научная новизна и значимость полученных результатов состоит в развитии теории и совершенствовании методов количественного расчета показателей надежности электрооборудования с учетом условий эксплуатации и заключается в следующем.

1. Уточнены модели оценки показателей долговечности и безотказности электрооборудования с учетом условий эксплуатации, позволяющие определять его фактический сработанный и остаточный ресурс, а также вероятность безотказной работы.
2. Разработаны и теоретически обоснованы модели оценки технического ресурса и показателей безотказности силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей и асинхронных электродвигателей.
3. Исследована взаимосвязь показателей долговечности и безотказности электрооборудования с учетом условий эксплуатации.
4. Разработаны принципы управления режимами работы электрооборудования на основе оценки показателей долговечности и безотказности.
5. Выполнена оценка технического ресурса и вероятностей безотказной работы и отказа силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей, асинхронных электродвигателей по реальным данным эксплуатации.

Практическая ценность работы. Практическое значение разработанных методов и моделей состоит в получении количественных значений показателей надежности электрооборудования с учетом воздействия реальных факторов, условий и режимов эксплуатации. Разработанные методы и полученные результаты позволяют наметить мероприятия, обеспечивающие повышение надежности, а также по-новому решать задачи эксплуатации и ремонта электрооборудования с учетом его технического состояния, что уменьшает число отказов электрооборудования и повышает надежность работы энергообъектов и электроснабжения потребителей.

Разработанные математические модели и алгоритмы расчета используются рядом генерирующих, сетевых и ремонтных компаний для оценки технического ресурса и вероятностей безотказной работы и отказа электрооборудования.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертации результаты исследований апробированы, внедрены и используются в практике работы на электростанциях Каскада Пазских ГЭС, объектов ОАО "ФСК ЕЭС" (Владимирском и Нижегородском ПМЭС), Александровском ПЭС, Печорской и Кармановской ГРЭС, Саровской ТЭЦ, ОАО "Ивановосетьремонт", ЗАО "Промэнергоремонт" и др.

Результаты исследований также используются в учебном процессе и научной работе Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ) и Петербургского энергетического института повышения квалификации (ПЭИПК). Положения и разработки диссертации вошли в специальные курсы, предназначенные для слушателей курсов факультетов повышения квалификации и студентов электроэнергетических специальностей.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Уточненные модели оценки показателей надежности электрооборудования различных типов и классов напряжения, учитывающие воздействие эксплуатационных факторов, режимов и условий работы.
2. Математические модели оценки показателей долговечности и безотказности силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей, асинхрон-

ных электродвигателей с учетом условий работы, а также модели управления режимами их эксплуатации.

3. Результаты численных и аналитических исследований по определению эксплуатационных показателей долговечности и безотказности для электрооборудования различных типов и классов напряжения.

Личный вклад соискателя. Приведенные в диссертации результаты являются составной частью НИР, выполняемых в ИГЭУ и ПЭИПК. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит формализация поставленных задач, разработка методов и математических моделей, реализация алгоритмов, обобщение и анализ результатов.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на 20 международных и всероссийских конференциях, симпозиумах и семинарах. Среди них: Екатеринбург (2004 г.), Иваново (2003, 2004, 2005 гг.), Иркутск (2004, 2005 гг.), Минск (2004 г.), Варна (2004 г.), Санкт-Петербург (2004, 2005 гг.), Псков (2005 г.), Чернигов (2004 г.), Москва (2003, 2004, 2005 гг.), Киев (2005), Красноярск (2005 г.), Томск (2004, 2005).

Диссертация обсуждалась и получила одобрение на расширенном заседании кафедр электроэнергетического факультета ИГЭУ (2005 г. Иваново, Россия).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 33 печатных работах, в том числе: 4 монографиях, 1 учебном пособии, 1 справочнике, 24 статьях в научных журналах и сборниках научных трудов, 3 тезисах докладов, опубликованных в материалах всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 159 наименований и 4 приложений. Общий объем диссертации составляет 240 страниц, из них 16 страниц в приложениях. В диссертации содержится 48 рисунков и 31 таблица.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи, указаны методы исследования, показана научная новизна и практическая ценность, приведена структура диссертации.

В первой главе проведен анализ эксплуатационной надежности электрооборудования, рассматриваются основные причины аварий и технологических нарушений.

Особое внимание уделено электрооборудованию электрических станций и подстанций (высоковольтным выключателям, силовым трансформаторам, асинхронным электродвигателям). Причиной отказов наряду с климатическими воздействиями и дефектами при монтаже и транспортировке является износ оборудования, доля которого в общем количестве отказов, сопровождающихся экономическим ущербом, непрерывно растет. Установлено, что износ основных производственных фондов в электроэнергетике составляет более 50% и продолжает расти. Следовательно, надежность электроэнергети-

ческих объектов в ближайшее время будет определяться надежностью и техническим состоянием действующего оборудования.

Снижение надежности электрооборудования связано с процессами старения, условиями и режимами работы. Современная нормативно-техническая документация вводит ограничения на параметры условий и режимов работы электрооборудования, а также на продолжительность его работы в том или ином режиме. Как правило, эти ограничения связаны с допустимым временем работы электрооборудования при различных температурах, что является недостаточным для достоверной оценки их эксплуатационной надежности.

Проведенная оценка точности и достоверности определения показателей надежности электрооборудования показала необходимость уточнения показателей безотказности, полученных на основе статистических данных о повреждаемости электрооборудования. Установлено, что отсутствие учета воздействия эксплуатационных факторов, реальных режимов и условий работы при определении интенсивности отказов конкретного электрооборудования приводит к существенному снижению точности и достоверности результатов.

Выполнен анализ моделей оценки показателей надежности электрооборудования. Существенный вклад в решение данной проблемы внесли участники Всероссийского научного семинара РАН "Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики". Методы и модели расчета надежности энергетического оборудования и электроэнергетических систем исследовались и развивались в работах отечественных и зарубежных авторов: Н.И. Воропая, П.Г. Грудинского, Ю.Б. Гука, В.Г. Китушина, Г.Ф. Ковалева, Л.А. Кошечева, Э.А. Лосева, Н.А. Манова, Л.А. Мелентьева, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мясникова, Б.Н. Неклепаева, В.А. Непомнящего, В.Р. Окорокова, Б.В. Папкина, А.С. Проникова, М.Н. Розанова, Ю.Н. Руденко, В.А. Савельева, В.В. Тисленко, Ю.А. Фокина, Ю.Я. Чукурева, В.А. Цветкова, Дж. Эндрени, Р. Биллингтона, Р. Алана, Г. Франка, С. Л. Хакими и др.

Однако проблема оценки показателей надежности с учетом условий эксплуатации в них исследована не достаточно полно. Существующие математические модели не учитывают в полном объеме условия работы электрооборудования и воздействующие при этом эксплуатационные факторы. Кроме того, фактически отсутствует унифицированный подход к численной оценке технического ресурса и показателей безотказности электрооборудования различных типов и классов напряжения, а также практически не исследована взаимосвязь показателей долговечности и безотказности электрооборудования. Решение этих задач позволяет более точно выполнить количественную оценку показателей надежности, перейти к системе технического обслуживания и ремонта электрооборудования по техническому состоянию, а также осуществлять рациональное управление режимами эксплуатации.

Во второй главе исследуются основные положения, связанные с оценкой технического ресурса электрооборудования при различных условиях эксплуатации как одного из основных показателей долговечности.

При этом под техническим ресурсом, согласно ГОСТ 27.002 – 89, понимается суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние, а наработка определяется как продолжительность или объем работы объекта. Величина наработки может быть определена как в именованных, так и в относительных единицах измерения. В работе сформулированы основные рекомендации по выбору единиц измерения наработки для электрооборудования различных типов и классов напряжения, соответствующих его технологическому назначению. Разработан подход для перехода от дискретных единиц измерения (например, количества коммутаций, пусков) к непрерывным (например, временным) и обратно, в основе которого лежит применение дельта-функции $\delta(t)$.

Предложено расширить и уточнить терминологию показателей надежности с позиций учета при их оценке условий эксплуатации введением терминов: нормативного R_0 и нормативного остаточного ресурса $R_{0,ост}$, фактического сработанного R и фактического остаточного ресурса $R_{ост}$. Разработан подход к определению данных показателей долговечности, который заключается в следующем.

Очевидно, что ухудшение технического состояния электрооборудования происходит непрерывно как при работе электрооборудования в нормативных, так и в ненормативных условиях эксплуатации. Это связано с накопительным характером развития дефектов и повреждений в конструктивных элементах и сборочных единицах электрооборудования. При утяжеленных режимах работы этот процесс происходит более интенсивно, а при облегченных – менее интенсивно относительно номинальных условий эксплуатации. Поэтому в условиях реальной эксплуатации необходимо выполнять корректировку ресурса R_0 с учетом интенсивности воздействия эксплуатационных факторов.

Проведенный анализ статистических данных о повреждаемости электрооборудования, а также обобщение результатов исследований, приведенных в научной литературе, позволили разработать следующую общую математическую модель определения фактического сработанного ресурса R^* (в относительных единицах – о.е.) для электрооборудования различных типов и классов напряжения:

$$R^* = R_0^* + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j^*} \exp \left(\sum_{i_T=1}^{N_T} \frac{(X_{i_T}^* - 1)}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_3=1}^{N_3} \frac{(X_{i_3}^* - 1)}{\Delta X_{i_3}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{(X_{i_M}^* - 1)}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{(X_{i_X}^* - 1)}{\Delta X_{i_X}^*} \right) dr^* - R_j^* \right), \quad (1)$$

где R_0^* – нормативный ресурс, $R_0^* = 1$ о.е.; $i_T = 1 \dots N_T$, $i_3 = 1 \dots N_3$, $i_M = 1 \dots N_M$, $i_X = 1 \dots N_X$ – количество тепловых, электрических, механических и химических эксплуатационных факторов; $X_{i_T}^*$, $X_{i_3}^*$, $X_{i_M}^*$, $X_{i_X}^*$ – величины i_T -го, i_3 -го, i_M -го, i_X -го эксплуатационных факторов, о.е.; $\Delta X_{i_T}^*$, $\Delta X_{i_3}^*$, $\Delta X_{i_M}^*$, $\Delta X_{i_X}^*$ – относительное (отнесенное к нормативному значению соответствующего эксплуатационного фактора) отклонение i_T -го, i_3 -го, i_M -го, i_X -го теплового, электрического, механического, химического факторов, о.е.; R_j^* – фактический срабо-

танный ресурс на j -м интервале наработки в нормативных условиях эксплуатации, о.е.; $j=1 \dots K$ – количество интервалов наработки объемом R_j^* .

По выражению (1) величина R^* рассчитывается за наработку в объеме R_0^* , причем $\sum_{j=1}^K R_j^* \leq R_0^*$. Если требуется рассчитать фактический ресурс за наработку r^* , отличную от наработки в объеме нормативного ресурса R_0^* , то в выражении (1) необходимо принять $R_0^* = r^*$, тогда $\sum_{j=1}^K R_j^* \leq r^*$.

Нормативный остаточный ресурс определяется, как $R_{0,ост}^* = 1 - R^*$, а фактический остаточный ресурс $R_{ост}^*$ корректируется с учетом дальнейших условий эксплуатации и определяется по выражению:

$$R_{ост}^* = R_{0,ост}^* - \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j^*} \exp \left(\sum_{i_T=1}^{N_T} \frac{(X_{i_T j}^* - 1)}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_3=1}^{N_3} \frac{(X_{i_3 j}^* - 1)}{\Delta X_{i_3}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{(X_{i_M j}^* - 1)}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{(X_{i_X j}^* - 1)}{\Delta X_{i_X}^*} \right) dr^* - R_j^* \right). \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) являются общими и справедливы для любых функций изменения эксплуатационных факторов на отрезке наработки R_j^* . Далее для упрощения математических выражений запишем функцию $X_i^*(r^*)$ как X_i^* , но при этом будем считать данный эксплуатационный фактор X_i^* функцией наработки r^* , если не оговорено иное.

Разработаны принципы управления режимами работы электрооборудования с учетом фактического сработанного ресурса, заключающиеся в получении совокупности эксплуатационных факторов $\{X_i^*\}$. Для этого в выражение (2) подставим требуемое значение остаточного ресурса $R_{0,ост}^* = R_{ост,тр}^*$ и $R_{ост}^* = R_{0,ост}^*$. Изменяя значения эксплуатационных факторов X_i^* , необходимо добиться выполнения тождества (2). Полученная при этом совокупность эксплуатационных факторов $\{X_i^*\}$ характеризует требуемый режим работы электрооборудования.

Разработан способ статического определения параметров модели оценки технического ресурса электрооборудования. Получены выражения для расчета эквивалентных значений эксплуатационных факторов, которые могут существенно упростить вычисление этого показателя долговечности.

Проведен анализ чувствительности математической модели оценки технического ресурса электрооборудования к изменению точности исходных данных и определены причины возникновения погрешностей модели. Отмечено, что основными причинами возникновения погрешностей модели являются вероятностный характер исходных данных и недостаточно полный учет всех групп эксплуатационных факторов, влияющих на сработку ресурса. Для

уменьшения погрешностей предложено использовать методы корреляционного и регрессионного анализа, теорий распознавания образов и нейронных сетей, а также проводить отбор значимых эксплуатационных факторов, влияние которых наиболее сильно сказывается на величине технического ресурса электрооборудования. Проведенные исследования показали, что точность результатов, полученных по разработанным моделям оценки технического ресурса, не ниже точности исходных данных. Также выполнена оценка влияния абсолютной погрешности средств измерения на точность определения фактического сработанного ресурса и предложен подход к оценке допустимого отклонения параметров математической модели с учетом требуемого отклонения фактического сработанного ресурса.

В третьей главе показана аналитическая взаимосвязь показателей безотказности и долговечности, заключающаяся в том, что чем больший износ имеет электрооборудование, тем больше вероятность того, что какое-либо эксплуатационное воздействие приведет к его отказу. Определены показатели безотказности с учетом технического ресурса электрооборудования, условий и режимов его работы.

Установлено, что определить интенсивность отказов λ в зависимости от всего множества условий эксплуатации крайне сложно. Поэтому целесообразно привести условия эксплуатации электрооборудования к нормативным с помощью модели оценки фактического сработанного ресурса, приведенной в главе 2.

Разработаны модели оценки показателей безотказности электрооборудования, отличающиеся от существующих учетом технических показателей эксплуатации, которые характеризуют воздействующие факторы в различных условиях и режимах работы. Получены выражения для определения вероятностей безотказной работы и отказа. Наиболее общее выражение для определения вероятности безотказной работы при воздействии совокупности эксплуатационных факторов $\{X_i\}$ в зависимости от наработки t имеет вид

$$P_{\{X_i\}}(t) = e^{-\int_0^t \lambda_0 dr}, \quad (3)$$

где λ_0 – нормативная интенсивность отказов, 1/ед. нар.; $R=R^* \cdot R_0$ – фактический сработанный ресурс, ед. нар. С учетом выражения (1), записанного в именованных единицах для наработки в объеме t^* , формула (3) после преобразований принимает вид

$$P_{\{X_i\}}(t) = \exp \left(\int_0^t -\lambda_0 dr \right) \cdot \left(\prod_{j=1}^K \int_0^{R_j} e^{-\int_{t^*=1}^{R_j} \left(\frac{N_T (X_{Tj}^* - 1)}{\Delta X_{Tj}^*} + \frac{N_D (X_{Dj}^* - 1)}{\Delta X_{Dj}^*} + \frac{N_M (X_{Mj}^* - 1)}{\Delta X_{Mj}^*} + \frac{N_X (X_{Xj}^* - 1)}{\Delta X_{Xj}^*} \right) dr} \cdot R_j \right) \quad (4)$$

В случае применения экспоненциального закона распределения ($\lambda_0 = \text{const}$) выражение (4) запишется в виде

$$P_{\{Xi\}}(r) = \exp \left(-\lambda_0 \left(r + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j} e^{\int_{t=1}^{N_T} \frac{(X_{i_Tj}^* - 1)}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_3=1}^{N_3} \frac{(X_{i_3j}^* - 1)}{\Delta X_{i_3}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{(X_{i_Mj}^* - 1)}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{(X_{i_Xj}^* - 1)}{\Delta X_{i_X}^*} dr - R_j \right) \right) \right). \quad (5)$$

При постоянных эксплуатационных факторах выражение (5) записывается следующим образом:

$$P_{\{Xi\}}(r) = \exp \left(-\lambda_0 \left(r + \sum_{j=1}^K R_j \left(e^{\int_{t=1}^{N_T} \frac{(X_{i_Tj}^* - 1)}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_3=1}^{N_3} \frac{(X_{i_3j}^* - 1)}{\Delta X_{i_3}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{(X_{i_Mj}^* - 1)}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{(X_{i_Xj}^* - 1)}{\Delta X_{i_X}^*} - 1} \right) \right) \right). \quad (6)$$

Получены также выражения для экспоненциального закона распределения при условии, если $\lambda_0=1/R_0$. При этом вероятность отказа во всех случаях определяется по выражению

$$Q_{\{Xi\}}(r) = 1 - P_{\{Xi\}}(r). \quad (7)$$

Разработана математическая модель оценки показателей безотказности электрооборудования на заданном интервале наработки Δr . Общие выражения для определения вероятностей безотказной работы и отказа имеют вид:

$$P_{\{Xi\}}(r, r + \Delta r) = \frac{P_{\{Xi\}}(r + \Delta r)}{P_{\{Xi\}}(r)}; \quad Q_{\{Xi\}}(r, r + \Delta r) = Q_{\{Xi\}}(r + \Delta r) - Q_{\{Xi\}}(r), \quad (8), (9)$$

где $P_{\{Xi\}}(r, r + \Delta r)$, $Q_{\{Xi\}}(r, r + \Delta r)$ – фактические вероятности безотказной работы и отказа на интервале наработки Δr ; $P_{\{Xi\}}(r)$, $Q_{\{Xi\}}(r)$ – фактические вероятности безотказной работы и отказа на интервале наработки $(0, r)$; $P_{\{Xi\}}(r + \Delta r)$, $Q_{\{Xi\}}(r + \Delta r)$ – фактические вероятности безотказной работы и отказа на интервале наработки $(r + \Delta r)$.

С учетом известных значений эксплуатационных факторов X_i на заданном интервале наработки Δr выражение (8), (9) примут вид:

$$P_{\{Xi\}}(r, r + \Delta r) = \exp \left(\sum_{j=K+1}^{K_2} \left(\int_0^{R_j} e^{\int_{t=1}^{N_T} \frac{(X_{i_Tj}^* - 1)}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_3=1}^{N_3} \frac{(X_{i_3j}^* - 1)}{\Delta X_{i_3}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{(X_{i_Mj}^* - 1)}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{(X_{i_Xj}^* - 1)}{\Delta X_{i_X}^*} dr - R_j} \right) - \lambda_0 dr \right); \quad (10)$$

$$Q_{\{Xi\}}(r, r + \Delta r) = \exp \left(- \int_0^{r_\Phi} \lambda_0 dr \right) \cdot [1 - P_{\{Xi\}}(r, r + \Delta r)], \quad (11)$$

где r_Φ – фактический сработанный ресурс к началу интервала Δr .

В случае применения экспоненциального закона распределения ($\lambda_0 = \text{const}$) выражение (10) запишется в виде:

$$P_{\{X_i\}}(\Delta r) = \exp \left[-\lambda_0 \left(\Delta r + \sum_{j=K1+1}^{K2} \left(\int_0^{R_j} e^{\sum_{i_T=1}^{N_T} \frac{(X_{i_Tj}^*-1)}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_3=1}^{N_3} \frac{(X_{i_3j}^*-1)}{\Delta X_{i_3}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{(X_{i_Mj}^*-1)}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{(X_{i_Xj}^*-1)}{\Delta X_{i_X}^*} dr - R_j \right) \right) \right]. \quad (12)$$

При постоянных эксплуатационных факторах выражение (12) примет вид

$$P_{\{X_i\}}(\Delta r) = \exp \left[-\lambda_0 \left(\Delta r + \sum_{j=K1+1}^{K2} R_j \left(e^{\sum_{i_T=1}^{N_T} \frac{(X_{i_Tj}^*-1)}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_3=1}^{N_3} \frac{(X_{i_3j}^*-1)}{\Delta X_{i_3}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{(X_{i_Mj}^*-1)}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{(X_{i_Xj}^*-1)}{\Delta X_{i_X}^*} - 1} \right) \right) \right]. \quad (13)$$

Вероятность отказа $Q_{\{X_i\}}(r, r+\Delta r)$ при экспоненциальном законе распределения при постоянных и непостоянных значениях эксплуатационных факторов X_i имеет вид

$$Q_{\{X_i\}}(r, r + \Delta r) = \exp(-\lambda_0 r_\phi) \cdot [1 - P_{\{X_i\}}(r, r + \Delta r)]. \quad (14)$$

Подставив в формулы (10) – (14) вместо r_ϕ нормативный ресурс R_0 , скорректированный с учетом воздействия эксплуатационных факторов и обозначенный как $R_{0\phi}$, получим выражения для определения фактических значений вероятности отказа и безотказной работы на интервале наработки Δr при сверхнормативной эксплуатации электрооборудования.

Кроме приведенных выражений получены зависимости для оценки вероятностей безотказной работы и отказа для различных законов распределения. Определены области применения полученных выражений с учетом функций изменения эксплуатационных факторов, интенсивности отказов и законов распределения вероятностей безотказной работы и отказа. Особое внимание уделено экспоненциальному закону, который характеризует надежность электрооборудования на интервале нормативной эксплуатации.

Проведено исследование чувствительности математической модели прогнозирования надежности электрооборудования к изменению точности исходных данных. Установлено, что при точности интенсивности отказов на уровне 5 % погрешность расчета вероятностей безотказной работы и отказа также не превышает 5 %. Произведена оценка влияния абсолютной погрешности интенсивности отказов на точность определения вероятностей безотказной работы и отказа электрооборудования.

Для повышения точности и обоснованности принимаемых решений на основе разработанных математических моделей оценки технического ресурса и показателей безотказности предложено использовать в качестве обобщенных показателей надежности гамма-процентный ресурс и фактический сработанный ресурс с учетом закона распределения и статистики отказов для различных типов электрооборудования.

В четвертой главе на основании теоретических положений, разработанных методов и общих математических моделей по оценке технического ресурса и показателей безотказности, разработанных в главах 2 и 3, выводятся частные расчетные выражения для различных типов электрооборудования:

высоковольтных выключателей, асинхронных электродвигателей, силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

Рассмотрим примеры разработанных математических выражений для определения фактического сработавшего и остаточного ресурса, а также вероятностей безотказной работы и отказа для указанных видов электрооборудования при использовании экспоненциального закона распределения.

Фактический сработанный и остаточный ресурс высоковольтных выключателей:

$$R^* = R_0^* + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j^*} e^{-\frac{X_1^*-1}{\Delta X_1^*} dr^*} - R_j^* \right); R_{\text{ост}}^* = R_{0,\text{ост}}^* - \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j^*} e^{-\frac{X_1^*-1}{\Delta X_1^*} dr^*} - R_j^* \right), \quad (15), (16)$$

где X_1^* – относительное значение эксплуатационного фактора, учитывающего воздействие коммутируемого выключателем тока I ; ΔX_1^* – относительное отклонение фактора X_1^* .

Фактический сработанный и остаточный ресурс силовых трансформаторов:

$$R^* = R_H^* + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j^*} e^{-\frac{\vartheta^*-1}{\Delta\vartheta^*} dr^*} - R_j^* \right); R_{\text{ост}}^* = R_{0,\text{ост}}^* - \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j^*} e^{-\frac{\vartheta^*-1}{\Delta\vartheta^*} dr^*} - R_j^* \right), \quad (17), (18)$$

где $\vartheta^* = \vartheta/\vartheta_0$; $\Delta\vartheta^* = \Delta\vartheta/\vartheta_0$; ϑ – температура наиболее нагретой точки; ϑ_0 – нормативная температура наиболее нагретой точки.

Фактический сработанный и остаточный ресурс силовых трансформаторов в установившемся режиме работы (постоянные значения эксплуатационных факторов на интервале наработки R_j^*):

$$R^* = r_H^* + \sum_{j=1}^K R_j^* (A_1 - 1); R_{\text{ост}}^* = R_{0,\text{ост}}^* - \sum_{j=1}^K R_j^* (A_1 - 1), \quad (19), (20)$$

$$A_1 = e^{\frac{1}{\vartheta_0} \left[\vartheta_{\text{охл}} + \Delta\vartheta_{\text{м.ном}} \left[\frac{1+d(S^*)^2}{1+d} \right]^x + \Delta\vartheta_{\text{ННТ.ном}} (S^*)^y \right] - 1} \quad (21)$$

$$A_1 = e$$

где $\vartheta_{\text{охл}}$ – температура охлаждающей среды; $\Delta\vartheta_{\text{м.ном}}$ – номинальное превышение температуры масла над температурой окружающей среды; S^* – относительная нагрузка трансформатора, равная отношению $S/S_{\text{ном}}$ (S – фактическая нагрузка трансформатора, $S_{\text{ном}}$ – номинальная нагрузка трансформатора); $d = \Delta P_K / \Delta P_{xx}$ – отношение потерь короткого замыкания ΔP_K к потерям холостого хода ΔP_{xx} (если неизвестно, то можно принять $d=5$); $x=0,9$ – для трансформаторов с системой охлаждения типа М и Д; $x=1,0$ – для трансформаторов с системой охлаждения типа ДЦ и Ц; $\Delta\vartheta_{\text{ННТ.ном}}$ – номинальное превышение температуры ННТ над тем-

пературой масла; $y=1,6$ – для трансформаторов с системой охлаждения типа М и Д; $y=1,8$ – для трансформаторов с системой охлаждения типа ДЦ и Ц.

Фактический сработанный и остаточный ресурс асинхронных электродвигателей:

$$R^* = r_H^* + \sum_{j=1}^K R_j^* (A_2 - 1); R_{ост}^* = R_{0.ост}^* - \sum_{j=1}^K R_j^* (A_2 - 1); \quad (22), (23)$$

$$A_2 = e^{\frac{1}{\vartheta_0} \left[\vartheta_{охл} + \frac{\Delta P T_d}{C} \right] - 1} \Delta \vartheta^*, \quad (24)$$

где ΔP – мощность потерь в электродвигателе; C – полная теплоемкость электродвигателя; T_d – тепловая постоянная времени.

Фактический сработанный и остаточный ресурс асинхронных электродвигателей в пусковых режимах:

$$R = r_H + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j} A_3 dr - R_j \right); R_{ост} = R_{0.ост} - \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j} A_3 dr - R_j \right); \quad (25), (26)$$

$$A_3 = e^{\frac{1}{\vartheta_0} \left[\vartheta_{охл} + \frac{r}{N} \left(\frac{4k_i I_{фн}}{\pi d^2 n_{пр} a} \right)^2 \right] - 1} \Delta \vartheta^*, \quad (27)$$

где k_i – кратность тока по отношению к номинальному; где $I_{фн}$ – номинальный ток фазы; d – диаметр проводников в пазу; a – число параллельных ветвей в фазе; $n_{пр}$ – число проводников в пазу; N – расчетный коэффициент.

Вероятность безотказной работы высоковольтных выключателей

$$P_{\{X_i\}}(r) = \exp \left(-\lambda_0 \left(r + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j^*} e^{\frac{X_I^* - 1}{\Delta X_I^*}} dr^* - R_j^* \right) \right) \right). \quad (28)$$

Вероятность безотказной работы силовых трансформаторов

$$P_{\{X_i\}}(r) = \exp \left(-\lambda_0 \left(r + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j} e^{\frac{\vartheta^* - 1}{\Delta \vartheta^*}} dr - R_j \right) \right) \right). \quad (29)$$

Вероятность безотказной работы силовых трансформаторов в установившихся режимах

$$P_{\{X_i\}}(r) = \exp \left(-\lambda_0 \left(r + \sum_{j=1}^K R_j (A_1 - 1) \right) \right). \quad (30)$$

Вероятность безотказной работы асинхронных электродвигателей

$$P_{\{X_i\}}(r) = \exp \left(-\lambda_0 \left(r + \sum_{j=1}^K R_j (A_2 - 1) \right) \right). \quad (31)$$

Вероятность безотказной работы асинхронных электродвигателей в пусковых режимах

$$P_{\{X_i\}}(r) = \exp \left(-\lambda_0 \left(r + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j} A_3 dr - R_j \right) \right) \right). \quad (32)$$

Вероятность отказа высоковольтных выключателей, силовых трансформаторов и асинхронных электродвигателей определяется по выражению (7).

Кроме моделей оценки показателей безотказности рассматриваемых типов электрооборудования в любой момент наработки r (формулы (28) – (32)) разработаны модели оценки показателей безотказности на заданном интервале наработки Δr .

По полученным выражениям проведены расчеты численных значений технического ресурса, а также вероятностей безотказной работы и отказа с учетом воздействия эксплуатационных факторов по реальным данным эксплуатации, полученным на различных энергообъектах. Расчеты включали в себя определение численных значений фактического сработанного и остаточного ресурса на основании ретроспективных данных об условиях эксплуатации, а также построение кривых вероятностей безотказной работы и отказа для определения численных значений вероятностей, как на заданном интервале наработки, так и в любой момент эксплуатации.

Приведем примеры определения фактического сработанного и остаточного ресурса, а также вероятностей безотказной работы и отказа для высоковольтных выключателей, силовых трансформаторов и асинхронных электродвигателей по реальным исходным данным их эксплуатации на действующих энергообъектах.

Высоковольтные выключатели. По разработанным выражениям произведена оценка фактического сработанного и остаточного ресурса, а также нормативного остаточного ресурса для вакуумного выключателя ВБЭК-35-31,5/1600 УХЛ2. Выключатель выполнил 21 коммутацию следующих токов: 1,6 кА (1 о.е.) – 2 раза (10^4 о.е.); 10 кА (6,25 о.е.) – 5 раз ($2,5 \cdot 10^4$ о.е.); 15 кА (9,375 о.е.) – 7 раз ($3,5 \cdot 10^4$ о.е.); 20 кА (12,5 о.е.) – 1 раз ($5 \cdot 10^5$ о.е.); 25 кА (15,625 о.е.) – 3 раза ($1,5 \cdot 10^4$ о.е.); 30 кА (18,75 о.е.) – 3 раза ($1,5 \cdot 10^4$ о.е.). Величина фактического сработанного ресурса составляет $R^* = 0,108$ о.е., или $R = 2142$ коммутации номинального тока. Нормативный остаточный ресурс $R_{0,ост}^* = 0,892$ о.е., или $R_{0,ост} = 17858$ коммутаций номинального тока. Предположив, что в будущем выключатель произведет 20 коммутаций (0,002 о.е.) тока величиной 20 кА (125 о.е.), можно определить фактический остаточный ресурс $R_{ост}^* = 0,784$ о.е., или $R_{ост} = 15714$ коммутаций номинального тока. Приведенные значения ресурса получены для количества коммутаций в циклах "включение-отключение". Для

перехода к непосредственному количеству включений или отключений вычисленные значения необходимо умножить на коэффициент k_{BO} . Определены значения коэффициентов k_{BO} для различных типов выключателей. Для выключателя ВБЭК-35-31,5/1600 УХЛ2 его значение составляет $k_{BO}=2$.

На рис. 1 приведены зависимости вероятности безотказной работы и отказа выключателя ВБЭК-35-31,5/1600 УХЛ2 на основе известных данных о количестве коммутаций токов различной величины. Вероятность безотказной работы данного выключателя за 1 коммутацию в зависимости от коммутируемого тока приведена на рис. 2.

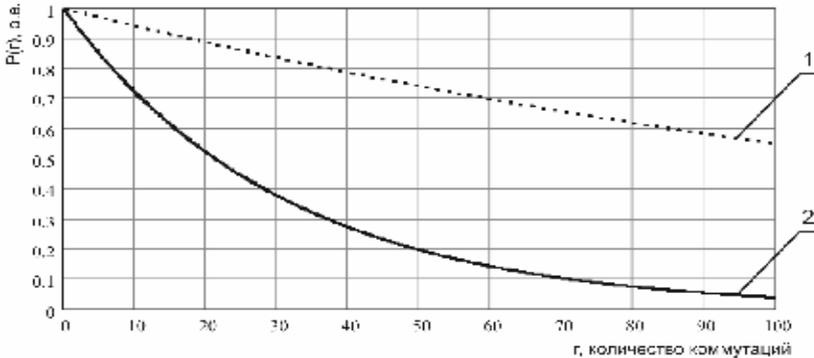


Рис. 1. Зависимость вероятности безотказной работы $P(r)$ выключателя ВБЭК-35-31,5/1600 УХЛ2 от числа коммутаций: 1 – для нормативных условий коммутации, 2 – для фактических условий коммутации

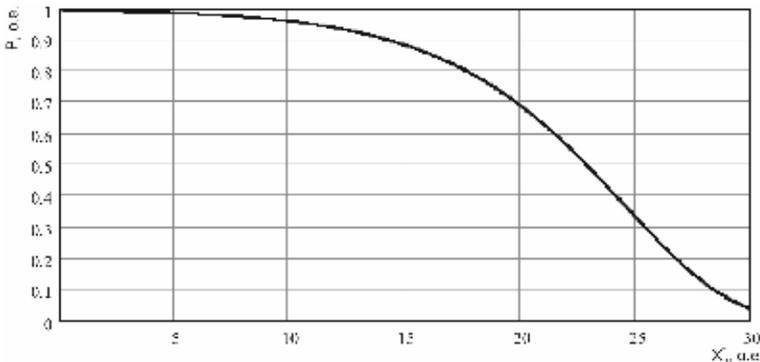


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы P выключателя ВБЭК-35-31,5/1600 УХЛ2 за 1 коммутацию от фактора коммутируемого тока X_1^*

Силовые трансформаторы. Трансформатор ТРДЦН-100000/220, параметры которого приведены в табл. 1, эксплуатировался в течение суток в соответствии с данными табл. 2.

Таблица 1. Параметры трансформатора ТРДЦН-100000/220

Тип	Система охлаждения	$\lambda_{0,-1}$ год ⁻¹	x	y	DJ, °C	DJ*, о.е.	J ₀ , °C
ТРДЦН-100000/220	ДЦ	0,025	1	1,8	8,656	0,088	98

Продолжение таблицы 1.

DJ _{ННТ,ном} , °C	DJ* _{ННТ,ном} , о.е.	DJ _{м,ном} , °C	DJ* _{м,ном} , о.е.	DP _к , кВт	DP _{хх} , кВт
38	0,388	40	0,408	340	102

Таблица 2. Режимы работы трансформатора ТРДЦН-100000/220 в течение суток

Номер режима j	1	2	3	4
Интервал наработки R _j , ч	16	6,5	0,5	1
Мощность S _j , МВА	96	92	100	80
Мощность S _j [*] , о.е.	0,96	0,92	1	0,8
Температура охлаждающей среды J _{охл,j} , °C	25	18	15	20
Температура охлаждающей среды J _{охл,j} [*] , о.е.	0,255	0,184	0,153	0,204

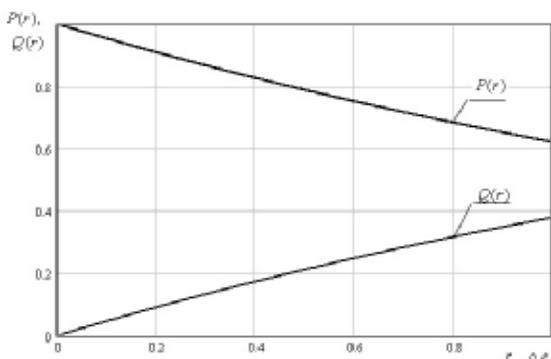


Рис 3. Зависимости вероятности безотказной работы $P(r)$ и вероятности отказа $Q(r)$ трансформатора ТРДЦН-100000/220 от наработки r при эксплуатации трансформатора в соответствии с данными табл. 2

Асинхронные электродвигатели. Электродвигатель АО2-32-2 мощностью 4 кВт работает с постоянной нагрузкой $P_2=3,5$ кВт в течение всего нормативного срока службы. Его потери $\Delta P=0,55$ кВт, а температура окружающей среды $\vartheta_{охл}$ составляет 30 °C. При этом $\Delta\vartheta=12,048$ °C; $\vartheta_0=105$ °C. Фактический сработанный ресурс в этом случае составляет $R^*=0,871$ о.е., или $R=17420$ ч, остаточный нормативный ресурс $R^*_{0,ост}=0,129$ о.е., или $R_{0,ост}=2580$ ч. Ресурс данного электродвигателя, который он фактически срабатывает за 1 пуск продолжительностью 10 с из холодного состояния, составляет $R=0,0035$ о.е., или 0,98 ч. Следовательно, при отсутствии других режимов работы двигатель может совершить аналогичных 20408 пусков.

Для 10 электродвигателей, эксплуатируемых в течение всего срока службы в соответствии с данными табл. 3, на рис. 4 приведены зависимости вероятностей безотказной работы P от наработки r .

Принимая во внимание, что в таком режиме трансформатор эксплуатировался в течение 25 лет, его фактический сработанный ресурс составляет $R^*=0,741$ о.е., или $R=18,5$ года, нормативный остаточный ресурс – $R^*_{0,ост}=0,259$ о.е., или $R_{0,ост}=6,5$ года. Вероятности безотказной работы и отказа в этом случае определяются по рис. 3.

Таблица 3. Распределение нагрузки электродвигателей по времени в течение суток

№	Тип	$P_{дв}/h_{дв}/DP_{дв}$, кВт/о.е./кВт			
		5ч	10ч	2ч	7ч
		50% P_n	90% P_n	110% P_n	70% P_n
1	АОЛ2-12-2	0,55/0,7/0,236	0,99/0,75/0,33	1,21/0,73/0,448	0,77/0,74/0,271
2	АОЛ2-22-2	1,1/0,82/0,241	1,98/0,83/0,406	2,42/0,8/0,605	1,54/0,81/0,361
3	АО2-31-2	1,5/0,8/0,375	2,7/0,84/0,514	3,3/0,83/0,676	2,1/0,82/0,461
4	АО2-32-2	2/0,82/0,439	3,6/0,86/0,586	4,4/0,83/0,901	2,8/0,83/0,573
5	АОЛ2-12-4	0,4/0,68/0,188	0,72/0,72/0,28	0,88/0,69/0,395	0,56/0,71/0,229
6	АОЛ2-21-4	0,55/0,71/0,225	0,99/0,76/0,313	1,21/0,75/0,403	0,77/0,74/0,271
7	АО2-22-4	0,75/0,78/0,212	1,35/0,82/0,296	1,65/0,79/0,439	1,05/0,81/0,246
8	АО2-31-4	1,1/0,81/0,258	1,98/0,83/0,406	2,42/0,82/0,531	1,54/0,82/0,338
9	АОЛ2-12-6	0,3/0,55/0,245	0,54/0,64/0,304	0,66/0,68/0,311	0,42/0,58/0,304
10	АОЛ2-22-6	0,55/0,7/0,236	0,99/0,74/0,348	1,21/0,74/0,425	0,77/0,72/0,299

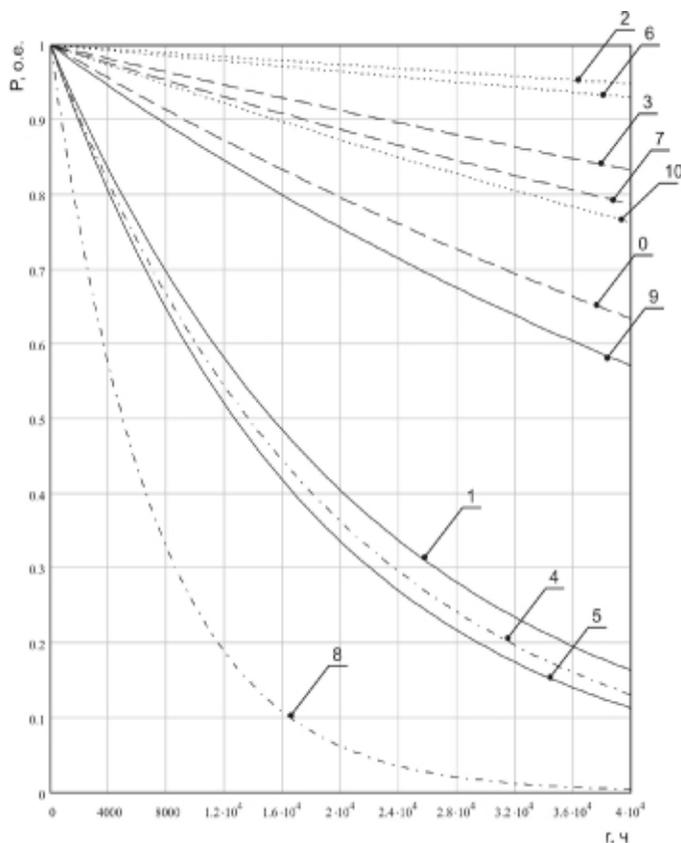


Рис. 4. Вероятность безотказной работы 10 электродвигателей серии АО2 (АОЛ2): номера зависимостей соответствуют номерам электродвигателей в табл. 3; 0 – экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы при $\lambda_0=0,1 \text{ год}^{-1}$

Разработанные частные модели позволяют расчетным путем определить значения фактического сработанного и остаточного ресурса, а также вероятностей безотказной работы и отказа на произвольном отрезке наработки (от начала эксплуатации) или фиксированном интервале наработки (после того как выключатель, трансформатор или электродвигатель уже сработали некоторый фактический ресурс) с учетом условий работы в установившихся и переходных режимах работы. Кроме того, проведенные расчеты контрольных примеров для электрооборудования различных типов показали также возможность применения разработанных моделей для целей управления режимами работы электрооборудования на основании контроля его технического ресурса и показателей безотказности.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Проведенные в диссертационной работе исследования можно рассматривать как решение проблемы количественной оценки показателей надежности электрооборудования с учетом воздействия эксплуатационных факторов, режимов и условий работы. Решенные в работе задачи имеют существенное значение для перехода к системе технического обслуживания и ремонта электрооборудования, а также управления процессом его эксплуатации в зависимости от полученных значений показателей надежности.

Наиболее существенные научные и практические результаты заключаются в следующем.

1. Проведен анализ эксплуатационной надежности электрооборудования электрических станций и подстанций, который показал, что снижение надежности работы электрооборудования связано с процессами старения, условиями и режимами работы. Рассмотрено влияние условий эксплуатации электрооборудования на его технический ресурс. Показано, что отсутствие учета эксплуатационных факторов, реальных режимов и условий работы при определении интенсивности отказов электрооборудования приводит к существенному снижению точности и достоверности результатов расчета показателей надежности. Обоснована необходимость определения показателей надежности с учетом условий эксплуатации электрооборудования.
2. Разработаны основные положения оценки технического ресурса электрооборудования в единицах измерения, соответствующих его технологическому назначению, учитывающие воздействие различных эксплуатационных факторов, условий и режимов работы. Получены общие расчетные выражения для определения фактического сработанного и остаточного ресурса электрооборудования в зависимости от воздействия тепловых, электрических, механических и химических эксплуатационных факторов. На этой основе предложен подход к управлению режимами эксплуатации электрооборудования с учетом его надежного функционирования на интервале наработки требуемого объема.

3. Показана аналитическая взаимосвязь показателей безотказности и долговечности электрооборудования. Сформулированы основные положения определения показателей безотказности с учетом технического состояния электрооборудования, а также условий и режимов его работы.
4. Разработаны математические модели оценки показателей безотказности электрооборудования, отличающиеся от существующих учетом технических показателей эксплуатации, которые характеризуют воздействующие факторы в различных условиях и режимах работы. Получены выражения для количественного определения вероятностей безотказной работы и отказа. Определены области применения полученных выражений с учетом функций изменения эксплуатационных факторов, интенсивности отказов и законов распределения вероятностей безотказной работы и отказа.
5. Для повышения точности и обоснованности принимаемых решений на основе разработанных математических моделей оценки технического ресурса и показателей безотказности различных типов электрооборудования предложено использовать в качестве обобщенных показателей надежности гамма-процентный ресурс и фактический сработанный ресурс с учетом закона распределения и статистики отказов. Обоснован подход к их определению.
6. Исследована чувствительность математических моделей оценки показателей надежности электрооборудования к изменению точности исходных данных. Произведена оценка влияния абсолютной погрешности средств измерения величины эксплуатационных факторов на точность определения фактического сработанного ресурса и вероятностей безотказной работы и отказа.
7. На основании общих моделей оценки показателей надежности электрооборудования, а также экспериментальных и статистических данных получены частные математические модели оценки технического ресурса и показателей безотказности высоковольтных выключателей, силовых трансформаторов, асинхронных электродвигателей. Получены выражения для определения фактического сработанного и остаточного ресурса, вероятностей безотказной работы и отказа данных видов электрооборудования на произвольном отрезке наработки (от начала эксплуатации) или на заданном интервале наработки при условии, что до него электрооборудование сработало некоторый фактический ресурс.
8. На основе реальных данных эксплуатации проведены расчеты численных примеров по определению показателей долговечности и безотказности с учетом воздействия эксплуатационных факторов, условий и режимов работы для электрооборудования различных типов и классов напряжений: вакуумных и элегазовых выключателей, силовых масляных трансформаторов, асинхронных электродвигателей. Достоверность полученных результатов подтверждается данными эксплуатации и ремонта этих видов электрооборудования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методика планирования объема профилактических мероприятий электрооборудования // Вестник ИГЭУ. – 2003. – №2–С. 68–74.
2. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методика определения предельных сроков продления эксплуатации электрооборудования // Вестник ИГЭУ. – 2003. – №5–С. 32–41.
3. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Определение предельного времени эксплуатации электрооборудования, отработавшего установленный срок службы // Вестник УГТУ-УПИ. Энергосистема: управление, качество, конкуренция: Сб. докл. II Всерос. науч.-техн. конф. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. №12 (42). – С. 333 – 337.
4. Диагностика как средство управления ремонтом электротехнического оборудования по техническому состоянию / В.А. Савельев, А.Н. Назарычев, А.И. Таджибаев, Д.А. Андреев // Вестник УГТУ-УПИ. Энергосистема: управление, качество, конкуренция: Сб. докл. II Всерос. науч.-техн. конф. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. №12 (42). – С. 357 – 361.
5. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Обеспечение эффективности энергосбережения на основе оценки технического ресурса электрооборудования // Энергосбережение и водоподготовка. – 2005. – №1–С. 35–41.
6. Назарычев А.Н., Таджибаев А.И. Андреев Д.А. Обоснование сроков эксплуатации электрооборудования // Промышленная энергетика. – 2005. – №4–С. 20–23.
7. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методика оценки фактического ресурса электрооборудования с учетом воздействия эксплуатационных факторов // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды ИГЭУ. Вып.6 – М.: Энергоатомиздат, 2003. – С. 287 – 305.
8. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Оценка чувствительности математической модели определения предельного срока эксплуатации электрооборудования к изменению точности задания исходных данных // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды ИГЭУ. Вып.6 – М.: Энергоатомиздат, 2003. – С. 275 – 286.
9. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005. – 224 с.
10. Назарычев А.Н., Андреев Д.А., Таджибаев А.И. Справочник инженера по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электрических станций и сетей. Централизованное и автономное электроснабжение объектов, цехов, промыслов, предприятий и промышленных комплексов / Под ред. А.Н. Назарычева. – М.: Инфра инженерия, 2006. – 928 с.
11. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методические основы определения предельных сроков эксплуатации и очередности технического перевооружения энергообъектов / Иван. гос. ун-т. – Иваново., 2005 – 168 с.

12. Интеграция в энергетике и экономическая безопасность государства / Д.А. Андреев, В.А. Артеменко, М.В. Аршевская и др.; Под общ. ред. Г.К. Вороновского и И.В. Недина. – К.: Знания Украины, 2005. – 552 с.
13. Экономическая безопасность государства и информационные технологии в ее обеспечении / Д.А. Андреев, А.В. Артеменко, В.А. Артеменко и др.; Под общ. ред. Г.К. Вороновского и И.В. Недина. – К.: Знания Украины, 2005. – 664 с.
14. Назарычев А. Н., Таджибаев А.И., Андреев Д.А. Совершенствование системы проведения ремонтов электрооборудования электростанций и подстанций. – СПб.: ПЭИПК, 2004. – 64 с.
15. Назарычев А.Н., Таджибаев А.И., Андреев Д.А. Исследование влияния перенапряжений на срок службы полимерной изоляции электрооборудования // *Материалы НТК: Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования*. Вып. 3. – Минск: Изд-во ПЭИПК, С-Петербург, 2004.– с. 188 – 200.
16. A. Nazarychev, D. Andreev, J. Gerhards Estimation procedure of factual resource of electrical equipment taking into account operational factors' influence // *Power and Electrical Engineering. Scientific Proceedings of Riga Technical University. Part 4. Vol. 13. Riga, Latvia, 2004.* – P. 95 – 104.
17. Назарычев А.Н., Андреев Д.А., Айтакунов Р.А. Методика оценки старения изоляционных конструкций при воздействии эксплуатационных факторов // *Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования*. Вып. 24. ПЭИПК. Иваново, 2004. – С. 29 – 42.
18. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методика оценки остаточного ресурса электроэнергетического оборудования по результатам замеров признаков состояния // *Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования*. Вып. 25. ПЭИПК. Санкт-Петербург, 2005. – С. 98 – 111
19. Модель оценки технического состояния контактной системы высоковольтных воздушных выключателей в стационарных режимах работы / А.Н. Назарычев, Д.А. Андреев, Ю.М. Комаров, Н.Н. Смирнов // *Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования*. Вып. 28. ПЭИПК. Санкт-Петербург, 2005. – С. 125 – 144.
20. Оценка показателей надежности асинхронных электродвигателей с учетом условий и режимов работы / А.Н. Назарычев, Д.А. Андреев, В.А. Савельев, Д.А. Анастасенков // *Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования*. Вып. 28. ПЭИПК. Санкт-Петербург, 2005. – С. 305 – 314.
21. Назарычев А.Н., Таджибаев А.И., Андреев Д.А. Оценка технического состояния силовых кабелей по результатам замеров эксплуатационных факторов // *Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования*. Вып. 28. ПЭИПК. Санкт-Петербург, 2005. – С. 332 – 345.
22. Андреев Д.А., Назарычев А.Н. Модель оценки технического состояния асинхронных электродвигателей // *Вестник научно-промышленного общества*. Вып. 9 – М.: Изд-во «АЛЕВ-В», 2005. – С. 95 – 98.

23. Андреев Д.А. Способ расчета фактического технического ресурса голых медных проводов // Вестник научно-промышленного общества. Вып. 9 – М.: Изд-во «АЛЕВ-В», 2005. – С. 99 – 101.
24. Андреев Д.А., Анастасенков Д.А., Назарычев А.Н. Способ оценки технического состояния асинхронных электродвигателей // Состояние и перспективы развития электротехнологии. XII Бенардосовские чтения: Тез. докл. междунар. науч.-тех. конф. Т.1. -Иваново, 2005. – С. 102.
25. Андреев Д.А. Определение показателей безотказности электрооборудования с учетом технического состояния // Состояние и перспективы развития электротехнологии. XII Бенардосовские чтения: Тез. докл. междунар. науч.-тех. конф. Т.1. -Иваново, 2005. – С. 104.
26. Исследование задач диагностирования в системе управления состоянием энергетического оборудования / А.Н. Назарычев, И. Колцунова, Д.А. Андреев, Н.И. Ратнер // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 25. ПЭИПК. Санкт-Петербург, 2004. – С. 81 – 89.
27. Назарычев А.Н., Тальянов С.Ю., Андреев Д.А. Планирование объемов профилактических мероприятий для электрооборудования электростанций и сетей // Состояние и перспективы развития электротехнологии. XI Бенардосовские чтения: Тез. докл. междунар. науч.-тех. конф., Т.1. – Иваново, 2003. – С. 150.
28. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Технология организации комплексной системы эксплуатации и ремонта электрооборудования по техническому состоянию // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 24. ПЭИПК. Иваново, 2004. – С. 15 – 24.
29. Андреев Д.А., Назарычев А.Н., Таджибаев А.И. Оценка технического ресурса оборудования как фактор энергетической безопасности регионов России // Энергоэффективность, энергосбережение и энергетическая безопасность регионов России: Материалы докл. V Всерос. совещания. – Томск, 10 – 12 ноября 2004 г. – Томск: ЦНТИ, 2004. – С. 165–172.
30. Андреев Д.А., Назарычев А.Н., Новиков Д.А. Разработка программы энергетического обследования электротехнической части энергообъектов // Энергоэффективность, энергосбережение и энергетическая безопасность регионов России: Материалы докл. VI Всерос. совещания – Томск, 16 – 17 ноября 2005 г. – Томск: ЦНТИ, 2005. – С. 108 – 114.
31. Nazarichev A., Andreev D., Tadzhibaev A. Priority Resolution of Modernization of Power Industry Objects. 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech Proceedings. Energy Systems Institute, St. Petersburg Polytechnical University. – S.-Pb., 2005. CD.
32. Nazarichev A., Savelyev V., Tadzhibaev A., Andreev D., Sergeeva E. Diagnostics as Instruments of Control of the Repair of Electrotechnical Equipment Due to Its Technical State. 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech Proceedings. Energy Systems Institute, St. Petersburg Polytechnical University. – S.-Pb., 2005. CD.