

На правах рукописи



Танфильева Дарья Васильевна

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ
СИЛОВЫХ МАСЛОПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Специальность 05.14.02 –
Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Левин Владимир Михайлович

Официальные оппоненты: Манусов Вадим Зиновьевич
доктор технических наук, профессор
Новосибирского государственного
технического университета, кафедра
СЭСП, профессор

Вдовико Василий Павлович,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник ООО
«Энергетика. Микроэлектроника.
Автоматика», ведущий специалист

Ведущая организация: ЗАО «Институт автоматизации
энергетических систем»,
г. Новосибирск

Защита состоится: «17» мая 2012 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «___» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимофеев Иван Петрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Силовые трансформаторы (СТ) являются наиболее сложным, ответственным и дорогостоящим оборудованием электростанций и электрических сетей. От безаварийной работы СТ зависит надежность функционирования подстанций и в целом всего электросетевого комплекса. Развивающиеся в процессе эксплуатации опасные дефекты СТ зачастую приводят к их отказам, последствиями которых являются нарушения бесперебойного электроснабжения потребителей, длительные простои электрооборудования, значительные ущербы от недоотпуска электроэнергии и затраты на восстановление работоспособного состояния. Для предотвращения указанных последствий особое значение приобретает раннее обнаружение и своевременное устранение развивающихся дефектов.

В современных условиях повышение эффективности эксплуатации электрических сетей связано с применением технологии диагностического контроля (мониторинга), обеспечивающей оценку и прогнозирование состояния СТ, а также определение оптимальной в смысле эксплуатационной надежности периодичности мероприятий технического обслуживания и ремонтов (ТОиР). Как известно технология диагностического контроля (мониторинга) базируется на измерениях и интерпретации диагностической информации, выявлении признаков развивающихся дефектов, установлении критериев для распознавания вида дефектов и оценки состояния СТ. Отсутствие универсальных подходов, позволяющих на единой методической основе получать описание показателей надежности СТ в зависимости от изменения эксплуатационных факторов и параметров состояния, затрудняет решение задач в рамках указанной технологии и ограничивает область ее эффективного применения.

В связи с этим одним из актуальных направлений повышения эффективности обслуживания СТ является совершенствование методик и критериев распознавания признаков и определения вида дефектов, методов повышения достоверности оценки состояния, а также разработка моделей надежности для оптимизации периодичности обслуживания СТ.

Значительный вклад в развитие методов и моделей оценки надежности и технического обслуживания сложных технических систем внесли отечественные и зарубежные ученые, такие как: Руденко Ю.Н., Беляев Ю.К., Ушаков И.А., Розанов М.Н., Китушин В.Г., Цветков В.А., Барзилович Е.Ю., Рябинин И.А., Шалин А.И., Назарычев А.Н., Байхельт Ф., Франкен П. и др. Широко известны работы в области совершенствования методов оценки состояния электрооборудования авторов: Сви П.М., Соколова В.В., Овсянникова А.Г., Таджибаева А.И., Попова Г.В., Осотова В.Н., Давиденко И.В., Вдовико В.П., Васина В.П., Долина А.П. и др.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка статистических моделей достоверного распознавания развивающихся дефектов в СТ по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ), а также разработка моделей надежности для определения оптимальной

периодичности обслуживания СТ.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

- проведен анализ существующих методов и моделей оценки надежности технических систем и электрооборудования для выявления возможности учета эксплуатационных факторов и результатов диагностирования;

- выполнен анализ распределений концентраций диагностических газов растворенных в масле силовых трансформаторов с определением наиболее информативных признаков и сокращением признакового пространства для повышения достоверности распознавания дефектов в СТ по результатам ХАРГ;

- разработан комплекс решающих правил, моделей и алгоритмов для распознавания наличия и вида дефектов в СТ на основе теории распознавания образов и аппарата нейронных сетей;

- разработана методика оценки параметров эксплуатационной надежности СТ, использующая статистику аварийных отключений и результатов диагностирования;

- разработаны модели расчета оптимальной периодичности обслуживания СТ, учитывающие комплексный критерий «затраты-надежность»;

- произведены расчеты оптимальной периодичности диагностирования и профилактического обслуживания СТ с применением данных реальной эксплуатации, на ряде конкретных примеров проверена достоверность разработанных моделей, методик и алгоритмов, выявлена область их эффективного применения;

- сформулированы требования к математическим моделям для оценки и прогнозирования состояния СТ, реализуемым в автоматизированных системах мониторинга и диагностики (АСМиД), разработаны модели и алгоритмы оценки состояния СТ по результатам ХАРГ для применения в АСМиД.

Методы исследования. Основные научные положения и результаты диссертационной работы базируются на применении фундаментальных и прикладных основ теории вероятностей и математической статистики, теории надежности, теории распознавания образов и искусственных нейронных сетей.

Обоснованность сформулированных в диссертационной работе теоретических положений и выводов вытекает из применения строгих математических методов, а **достоверность** разработанных моделей и полученных с их помощью практических результатов подтверждается совпадением с выводами протоколов диагностических испытаний и данными нормативной документации.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработаны модели и адаптивные алгоритмы достоверной идентификации развивающихся дефектов и их видов в силовых маслонаполненных трансформаторах по статистике хроматографического анализа растворенных газов, основанные на теории распознавания образов и искусственных нейронных сетей.

2. Получена методика преобразования исходного пространства контролируемых параметров в новое пространство информативных признаков меньшей размерности для повышения достоверности распознавания дефектов и возмож-

ности визуализации оценки состояния силовых маслонаполненных трансформаторов.

3. Предложен информативный показатель эксплуатационной надежности силовых маслонаполненных трансформаторов – параметр потока дефектов, рассчитываемый по разработанным моделям с применением статистики ХАРГ.

4. Разработана методика расчета оптимальной периодичности технического обслуживания и ремонтов СТ на основе моделирования показателей эксплуатационной надежности с применением однородных марковских процессов с непрерывным временем.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

1. Разработанные математические модели, методики и алгоритмы в отличие от существующих: повышают достоверность оценки текущего состояния трансформатора по результатам ХАРГ, позволяют выполнить расчеты показателей эксплуатационной надежности СТ с учетом развития дефектов, дают возможность определить оптимальную в смысле комплексного критерия «затраты-надежность» периодичность диагностического и профилактического обслуживания СТ. Предложенные модели и методики адаптированы для использования при разработке программно-алгоритмического обеспечения АРМ эксплуатационного персонала предприятия электрических сетей, а также в АСМиД СТ.

2. Диагностические модели и методика распознавания дефектных силовых трансформаторов по результатам ХАРГ нашли применение в практике эксплуатации филиала «Ноябрьские электрические сети» ОАО «Тюменьэнерго», методики оценки эксплуатационной надежности и расчета оптимальной периодичности обслуживания СТ используются в ООО «Ноябрьскэнергонефть» для проверки эффективности принятой стратегии эксплуатации оборудования. Кроме того, указанные разработки внедрены в учебный процесс кафедры автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика формирования пространства информативных диагностических признаков для достоверного распознавания развивающихся дефектов СТ для сокращения исходной размерности признакового пространства.

2. Модели и алгоритмы идентификации развивающихся дефектов и их видов по результатам ХАРГ, основанные на использовании теории распознавания образов и аппарата искусственных нейронных сетей и адаптированные к применению в АСМиД СТ.

3. Обоснование применения параметра потока дефектов СТ в качестве одного из контролируемых показателей эксплуатационной надежности, определяемого по статистическим данным диагностических измерений (например, на основе статистики ХАРГ).

4. Методика оценки параметров эксплуатационной надежности СТ, использующая статистику аварийных отключений и результатов диагностирования, а также модели расчета оптимальной периодичности обслуживания СТ, учитывающие комплексный критерий «затраты-надежность».

5. Модели эксплуатационной надежности СТ, реализующие стратегии предупредительного (профилактического) обслуживания и обслуживания по фактическому состоянию.

6. Результаты расчетов и проверки оптимальной периодичности диагностирования и профилактического обслуживания СТ с применением данных реальной эксплуатации; достоверности разработанных моделей, методик и алгоритмов с оценкой области их эффективного применения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: всероссийской научно-технической конференции молодых учёных «Наука. Техника. Инновации» (Новосибирск, 2005-2009), всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до рационального использования» (Томск, 2008), 2-м и 4-м семинарах Общественного совета по диагностике электроустановок Сибири и Дальнего востока (Красноярск, 2007 и Белокуриха 2009), международной молодежной научно-технической конференции «Управление, информация, оптимизация в электроэнергетических системах» (Новосибирск, 2011), а также научных семинарах кафедры автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ.

Личный вклад. Автором совместно с научным руководителем: разработаны общие принципы формирования моделей эксплуатационного обслуживания СТ; сформулированы требования к математическим моделям для оценки и прогнозирования состояния СТ, реализуемым в автоматизированных системах мониторинга и диагностики (АСМиД). Самостоятельно разработаны: комплекс решающих правил, моделей и алгоритмов для распознавания наличия и вида дефектов в СТ с возможностями методов искусственного интеллекта; методика оценки параметров эксплуатационной надежности СТ по статистике аварийных отключений и результатам диагностирования; модели расчета оптимальной периодичности обслуживания СТ; выполнены вычислительные эксперименты по верификации разработанных моделей.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из которых: 3 статьи в рецензируемых периодических изданиях, рекомендованных ВАК, 1 научная статья в сборнике научных трудов 11 – научных статей в сборниках трудов международных и всероссийских конференций.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка источников из 108 наименований и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 178 страницах, содержит 58 рисунков и 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и выполнена постановка задач исследования, указывается научная новизна и практическая ценность, приведено краткое изложение содержания работы.

В первой главе с позиций системного подхода рассмотрено современное содержание понятия «эксплуатация оборудования электростанций и электриче-

ских сетей». Отмечается, что процесс эксплуатации электрооборудования и в частности силовых трансформаторов следует рассматривать как управляемый процесс, реализация которого выполняется по определенным целевым установкам (критериям). Выбор и обоснование критерия управления эксплуатацией СТ представляет собой весьма актуальную и достаточно сложную задачу, так как требует учета многих влияющих факторов, зачастую не поддающихся формализации. Одной из особенностей управляемого процесса эксплуатации СТ является проявление случайных событий, изменяющих его состояние, а, следовательно, и параметры управления. Так, например, событие «отказ» переводит объект из работоспособного состояния в не работоспособное. Использование диагностирования для контроля, оценки и прогнозирования состояния СТ позволяет ввести в рассмотрение такое событие как «дефект». Возникновение дефекта в СТ понижает уровень его работоспособности. Чем тяжелее стадия развития дефекта, тем ниже уровень работоспособности объекта. В предельном случае развивающийся дефект может перерасти в отказ СТ со всеми вытекающими последствиями. На практике диагностирование не всегда способно обеспечить достоверное распознавание факта наличия или отсутствия развивающегося дефекта в СТ, что затрудняет введение своевременных и адекватных эксплуатационных воздействий. Наличие возможных ошибок диагностирования (пропуск дефекта, ложная тревога) также требует учета при построении эффективной системы управления эксплуатацией. Одной из основных задач управления эксплуатацией СТ является предотвращение внезапных отказов или, по крайней мере, максимальное снижение риска их возникновения. Это достигается выбором соответствующих параметров управления. В работе обосновывается необходимость построения формализованного описания управляемых процессов эксплуатации трансформаторов с возможностью моделирования стратегии управления, выбора (оптимизации) ее параметров, а также учета ряда факторов, оказывающих на них наибольшее влияние. Определены место и роль специальных моделей, критериев и алгоритмов в системе управления процессом эксплуатации СТ. Выполнен анализ эволюции стратегий ТОиР и методов оценки эксплуатационной надежности СТ, на основе которого произведен выбор наиболее перспективных направлений совершенствования и разработки комплекса моделей, критериев и методик их практического применения. В частности, обосновывается необходимость: использования вероятностно-статистического подхода и аппарата нейронных сетей для построения моделей диагностики, отличающихся высокой достоверностью распознавания дефектов в СТ; использования аппарата однородных марковских процессов с непрерывным временем для моделирования и оптимизации параметров обслуживания СТ.

Во второй главе представлена разработка статистических моделей диагностики силовых трансформаторов, повышающих достоверность оценки состояния по результатам хроматографического анализа растворенных газов. Метод ХАРГ обладает высокой чувствительностью к изменению концентраций растворенных в масле газов и является общепризнанным методом раннего обнаружения дефектов. Оценка состояния СТ производится по методике РД 153-

34.0-46.302-00, которая в диссертационной работе принята в качестве базовой модели (эталона) для сравнения эффективности разрабатываемых моделей диагностики. Базовая модель основана на сравнении измеренных концентраций диагностических газов A_i с известными граничными значениями $A_{грi}$ ($i = 1 - 7$) и в ряде случаев не обеспечивает высокой достоверности диагноза. Это происходит отчасти по причине не корректного задания граничных концентраций некоторых газов, а отчасти в связи с не учетом влияния ряда эксплуатационных факторов.

В диссертации для разработки моделей достоверного определения наличия и вида развивающихся дефектов в СТ по результатам ХАРГ предложено использование аппарата теории распознавания образов. Согласно классической теории задача распознавания образов состоит из следующих подзадач: предварительной подготовки данных, выбора информативных признаков и построения классификатора. Каждая из подзадач имеет особенности в решении в зависимости от свойств контролируемых параметров объекта. Так, например, для лучшей разделимости классов состояний СТ контролируемые параметры x_i , составляющие входной вектор $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$, должны быть соизмеримы и обеспечивать однородность выборки. Признаки y_j , формирующие вектор $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m]$ и служащие для описания классов состояний, должны иметь одинаковый закон распределения. Тогда удастся построить классификатор, обеспечивающий линейную разделимость классов. Априори наилучшим классификатором для двух классов состояний C_1, C_2 , минимизирующим ошибку распознавания, является байесовское решающее правило:

$$h(X) = -\ln l(X) = -\ln P(X / C_1) + \ln P(X / C_2) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \ln \frac{P(C_1)}{P(C_2)} \rightarrow X \in \begin{cases} C_1 \\ C_2 \end{cases}. \quad (1)$$

Однако его применение предполагает знание априорных вероятностей $P(C_i)$ и условных плотностей вероятности $P(X / C_i)$, показывающих принадлежность объекта к i классу, а также нормальный закон распределения признаков.

В диссертации для разработки моделей распознавания были исследованы статистические характеристики массивов данных, сформированных из протоколов ХАРГ СТ 110 кВ, эксплуатируемых филиалом «Восточные электрические сети» ЗАО «РЭС» и филиалом «Ноябрьские электрические сети» ОАО «Тюменьэнерго». Исследованию подлежали выборки объемом 1340 и 1560 протоколов за период эксплуатации 10 лет. Проверка гипотезы об однородности выборок в обоих случаях подтвердила ее состоятельность. Кроме того, показано, что информативность контролируемых параметров повышается при переходе от абсолютных концентраций диагностических газов A_i , имеющих существенно разные пределы измерения, к относительным концентрациям, промасштабированным по своим граничным значениям $a_i = A_i / A_{грi}$. Это исключает доминирование какого-либо газа, который «притягивал» бы к себе определенный класс состояний и, искажая модель распознавания, формировал бы ошибку диагноза. Несмотря на недостаточную информативность полученные выборки не

подчиняются нормальному закону распределения, что существенно затрудняет их применение в задаче статистического распознавания состояний СТ.

В работе возможность формирования пространства признаков, удовлетворяющих условиям наилучшей разделимости классов состояний, реализована с помощью метода факторного анализа. Применение данного метода позволяет ранжировать факторы по степени значимости и выделить из них наиболее значимые, которые затем и используются в модели распознавания. В результате выбора значимых факторов и исключения малозначимых производится преобразование исходного многомерного пространства контролируемых параметров X в пространство информативных признаков Y меньшей размерности $Y = \Phi^T \cdot X$. Здесь Φ – матрица преобразования размерностью $k < n$. Выбор достаточного количества значимых факторов производится по минимуму среднеквадратичной ошибки распознавания $\varepsilon^2(k) = \sum_{i=k+1}^n \Phi_i^T \cdot \lambda \cdot \Phi_i = \sum_{i=1}^k \lambda_i$, где λ_i , Φ_i –

собственные числа и собственные векторы ковариационной матрицы случайного вектора X . Таким образом, эффективность каждого признака с точки зрения представления вектора X оценивается собственным числом ковариационной матрицы. Если некоторый признак, чье собственное число минимально, исключается из рассмотрения, то среднеквадратическая ошибка увеличивается на λ_i . Распределение полученных признаков подчиняется нормальному закону.

Рассмотрено применение данного метода на примере семимерного пространства относительных концентраций диагностических газов, растворенных в масле СТ 110 кВ филиала «Восточные электрические сети» ЗАО «РЭС». Из матрицы столбца собственных чисел видно, что наиболее значимыми факторами являются с первого по четвертый. Данные значения приходятся на водород H_2 , метан CH_4 , этилен C_2H_4 и этан C_2H_6 .

$$\lambda = [3,0774 \quad 1,4391 \quad 1,0039 \quad 0,7125 \quad 0,5225 \quad 0,0735 \quad 0,1710]^T.$$

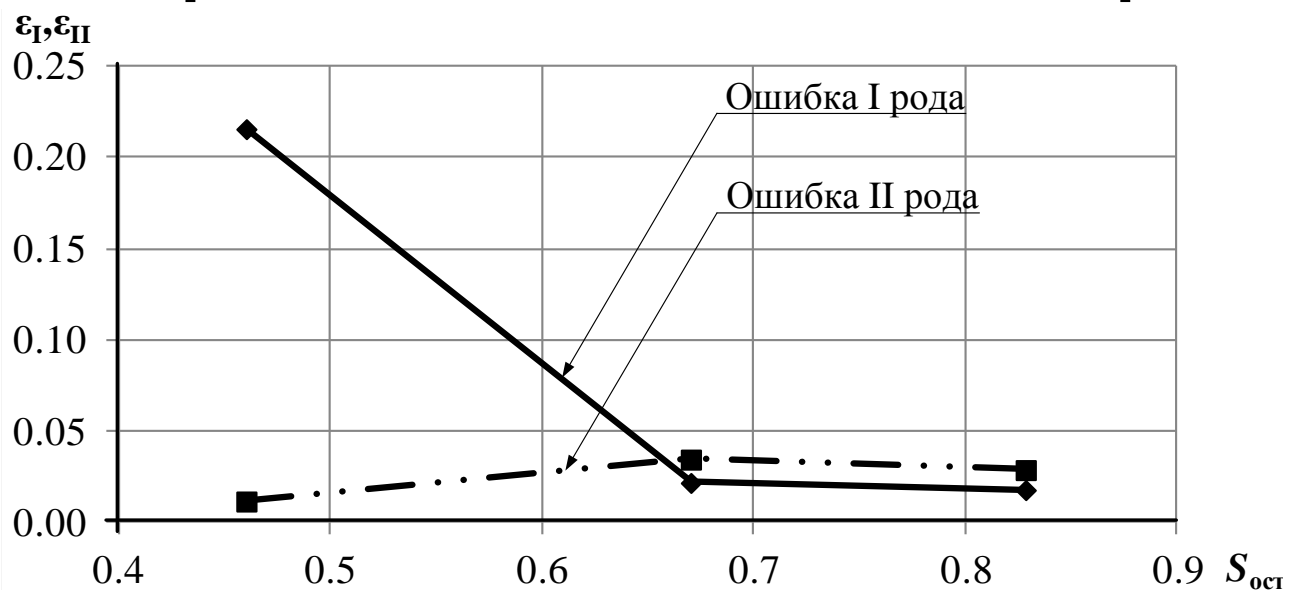


Рис.1. Ошибка распознавания в зависимости от $S_{ост}$.

Результаты расчетов и анализа ошибок распознавания дефектов в зависимости от количества учитываемых факторов (остаточной дисперсии матрицы

нагрузок – $S_{\text{ост}}$) показывают, что учет только первых трех факторов уже снижает ошибку распознавания до 2 – 3%, что является весьма приемлемым для практической диагностики СТ (рис.1.).

Повышение достоверности распознавания дефектов СТ по результатам ХАРГ в работе реализовано с применением метода нелинейного преобразования входных данных в пространство более высокой размерности. Теоретическую основу метода составляет теорема Ковера о разделимости образов. В результате нелинейного преобразования исходного множества относительных концентраций a_i диагностических газов получен новый признак, представляющий собой функцию вида:

$$G = \frac{1}{\sum_{i=1}^7 a_i} \cdot \sum_{i=1}^7 a_i^2.$$

Применение полученного признака позволяет трансформировать семимерное пространство исходных параметров на числовую ось, $G \in [0 \div \infty)$. Проверка гипотезы о нормальном законе распределения случайного признака G подтвердила ее состоятельность. На рис.2 приведено эмпирическое распределение случайного признака G для двух классов состояний C_1 – нормально работающих (бездефектных) и C_2 – с отклонением от нормы (дефектных) для группы из 98 СТ 110 кВ с различным сроком службы и номинальной мощностью.

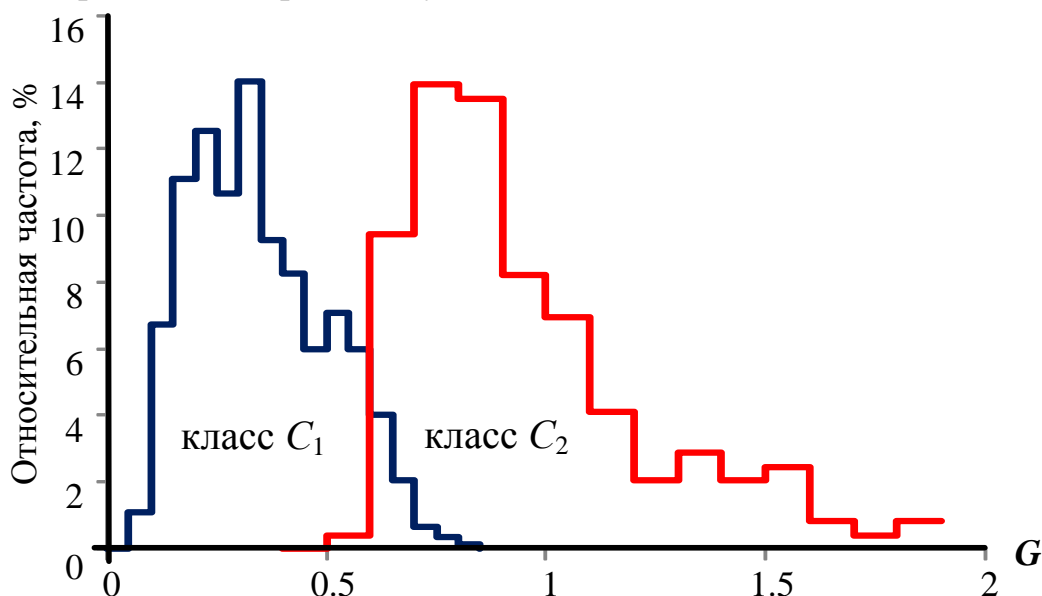


Рис.2. Гистограммы относительных частот признака G .

Построение границы раздела классов состояний обследуемой группы СТ по формуле (1) позволяет получить ее аналитическое описание:

$$G = \frac{\tilde{M}_1 \tilde{D}_2 - \tilde{M}_2 \tilde{D}_1 \pm \sqrt{R}}{\tilde{D}_2 - \tilde{D}_1}, \quad (2)$$

где: $\tilde{M}_1, \tilde{M}_2, \tilde{D}_1, \tilde{D}_2$ – оценки математического ожидания и дисперсии признака G двух классов; R – дискриминант уравнения. Проведенные исследования показали, что минимальная суммарная ошибка идентификации дефектного состояния СТ (2,91%) получается если в качестве границы раздела классов со-

стояний принять $G_{гр} = 0,697$. Это подтверждено расчетами на множестве примеров из практики эксплуатации СТ.

Таким образом, получено решающее правило для достоверной идентификации развивающегося дефекта в трансформаторе $G \underset{<}{>} G_{gp} = 0,697 \rightarrow \begin{cases} C_1 \\ C_2 \end{cases}$.

В диссертации с использованием нелинейного преобразования построена модель распознавания вида дефекта в СТ. В качестве исходных параметров, как и в базовой методике, приняты отношения концентраций характерных газов $x_1 = C_2H_2/C_2H_4$, $x_2 = CH_4/H_2$, что, тем не менее, не обеспечивает разделимости классов. Поэтому для формирования линейно-разделимых классов произведено логарифмирование исходных параметров:

$$\varphi(X) = \left[\ln\left(\frac{C_2H_2}{C_2H_4}\right) \quad \ln\left(\frac{CH_4}{H_2}\right) \right]^T.$$

Сформированные признаки позволили выделить три класса состояний по видам развивающегося дефекта (C_{21} – «разряд», C_{22} – «перегрев», C_{23} – «разряд и перегрев»), а, кроме того, сформулировать комплекс решающих правил, на основе байесовского классификатора, вид которого сводится к каноническому уравнению линии второго порядка:

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F \underset{<}{>} 0, \quad (3)$$

где: A, B, C, D, E, F – рассчитываемые коэффициенты модели.

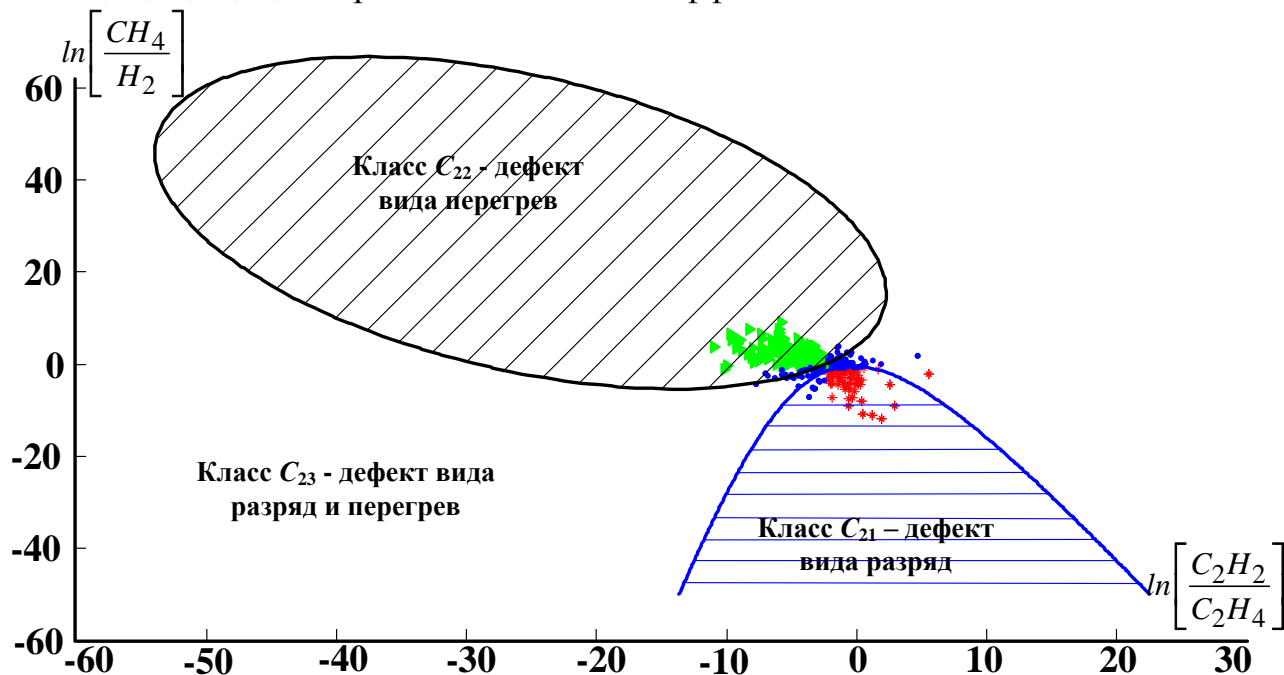


Рис.3. Общее решающее правило для идентификации видов дефектов

Практическое применение классификатора (3) производится в соответствии с разработанным комплексом решающих правил (рис.3.):

- если $G_1(x_1, x_2) < 0$, в трансформаторе прогнозируется дефект вида «разряд»;

- если $G_I(x_1, x_2) > 0$, в трансформаторе прогнозируется либо «перегрев», либо «разряд и перегрев», необходимо проверить второе условие;
- если $G_{II}(x_1, x_2) < 0$, в трансформаторе прогнозируется дефект вида «перегрев»;
- если $G_{II}(x_1, x_2) > 0$, в трансформаторе прогнозируется «разряд и перегрев».

Пример. В трансформаторе 2Т, ТДТН-40000/110 кВ ПС «Центральная» филиала «Восточные электрические сети» ЗАО «РЭС» при очередном анализе по графику 01.07.1996 были зарегистрированы следующие концентрации газов (табл.1.). Отмечено превышение граничных концентраций этилена C_2H_4 и ацетилена C_2H_2 с относительной скоростью менее 10% мес. Для подтверждения результатов ХАРГ следующий анализ был проведен через 2 месяца 27.08.1996 и также показал превышения граничных концентраций C_2H_4 и C_2H_2 .

Заключение по базовой методике: прогнозируется дефект вида «перегрев». Горячая точка в сердечнике, перегрев меди из-за вихревых токов, плохих контактов, циркулирующие токи в сердечнике или баке. Дефектом затронута твердая изоляция. Повторный анализ пробы масла 13.08.1997 г. подтвердил поставленный ранее диагноз – дефект вида «перегрев». Трансформатор выведен в ремонт.

Таблица 1

Концентрации диагностических газов 2Т ПС «Центральная»

Дата анализа	Абсолютные концентрации газов, %об.						
	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	CO_2	CO
01.07.96	8,9E-4	0,002	0,0179	8,39E-4	0,00132	0,06	0,012
27.08.96	0,0012	0,0046	0,0203	0,0026	0,00107	0,061	0,016
a_i	0,089	0,2	1,79	0,166	1,32	0,075	0,2
	0,115	0,457	2,03	0,528	1,07	0,0763	0,2667
$V_{отн}$ % мес.	15,375	67,632	7,0567	114,77	-9,9681	0,8772	17,544
Отношения	C_2H_2/C_2H_4		CH_4/H_2		C_2H_4/C_2H_6		CO_2/CO
	0,073743		2,247191		21,57		5
	0,052709		3,973913		7,68		3,81
Диапазон	<0.1		>0.5		≥ 3		≥ 5 и ≤ 13 <5

Заключение по разработанной методике: по результатам первого анализа в СТ прогнозируется развивающийся дефект $G=1,319 > G_{гр}=0,697$ вида «перегрев», что соответствует условию $G_{II}=-5,316 < 0$. Повторный анализ также подтвердил наличие дефекта «перегрев» $G=1,2863 > G_{гр}=0,697$, $G_{II}=-8,468 < 0$.

В третьей главе рассмотрено применение разработанных в диссертации статистических моделей распознавания наличия и вида дефектов СТ в автоматизированных системах мониторинга и диагностики (АСМиД), которыми оснащают подстанции электрических сетей в целях повышения надежности и эффективности эксплуатации оборудования. Проведен анализ структурно-

функциональных особенностей и информационного обеспечения АСМиД, сформулированы требования к моделям мониторинга и оценки текущего состояния СТ, среди которых отмечается:

- 1) простота математического аппарата;
- 2) возможность использования статистики однотипных трансформаторов наряду с текущими измерениями параметров контролируемого объекта;
- 3) максимальная достоверность получаемых оценок (минимум ошибок диагноза);
- 4) возможность адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации (обучаемость моделей);
- 5) инвариантность к количественным и качественным характеристикам входного информационного пространства;
- б) высокая степень визуализации результатов и удобства для анализа.

Сформулированным требованиям в полной мере удовлетворяют статистические модели на основе байесовского классификатора. Разработанные модели и методика распознавания признаков возникновения дефектов и определения их вида в СТ на основе анализа газосодержания в масле реализованы в виде 1-го и 2-го алгоритмов обработки диагностической информации и формирования заключения. Структура 1-го алгоритма содержит две последовательные итерации. На первой итерации по имеющейся базе измеренных концентраций газов проводится расчет эмпирических распределений, оценка их параметров и определение граничного значения решающего правила $G_{гр}$. Для каждого очередного измерения концентраций диагностических газов по разработанной модели производится вычисление текущего значения функции G , которое фиксируется в блоке хранения информации и расчета относительных частот. Полученное текущее значение G сравнивается с граничным значением ($G_{гр}$), а результат сравнения служит для формирования заключения о текущем состоянии СТ. Если в результате работы 1-го алгоритма выносится заключение о наличии дефекта в СТ, производится запуск 2-го алгоритма. В случае ошибки диагноза (ложная тревога), производится пересчет законов распределения G и уточнение $G_{гр}$. Необходимость пересчета $G_{гр}$ возникает также при повышенном газосодержании, которое может быть вызвано перепадами температур, повышенным увлажнением масла, увеличением нагрузки трансформатора. В этом случае количество замеров в классе бездефектного состояния увеличивается, параметры распределения изменяются, граничное значение $G_{гр}$ также переопределяется, что приводит к снижению ошибки распознавания.

Следует отметить, что алгоритмы, реализующие модели на основе байесовского классификатора, обеспечивают достоверные оценки только при наличии статистики газосодержания. При вводе нового СТ, когда база данных отсутствует, требуется блокировка их работы на время, необходимое для накопления достаточного объема статистической информации и построения эмпирических законов распределения каждого из классов состояний.

Построение адаптивных моделей и алгоритмов диагностики СТ, способных к обучению и переобучению на малых выборках данных в диссертации выполнено с применением аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС).

Простейшей ИНС является однослойный перцептрон, предназначенный для классификации линейно-разделимых сигналов (рис.4.). Входными сигналами модели являются измеряемые концентрации семи растворенных в масле диагностических газов, а в качестве функции активации принята функция единичного скачка.

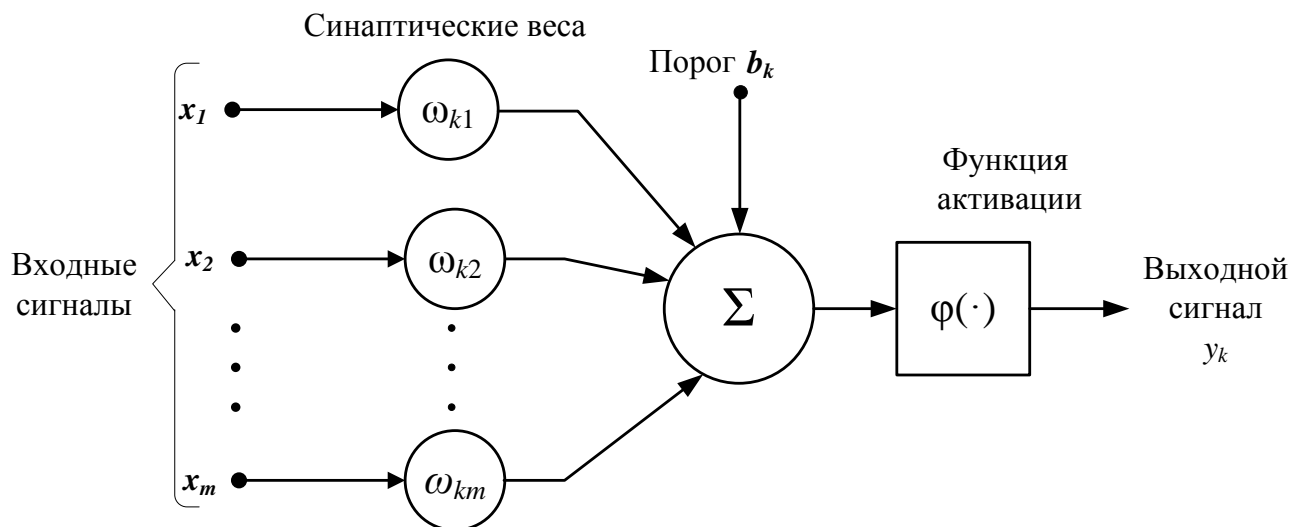


Рис.4. Граф передачи сигнала перцептрона

Выходной сигнал, $y_k(n) = \varphi \left(\sum_{i=0}^7 \omega_i(n) \cdot x_i(n) \right)$ где $\omega_0(n)$ – пороговое значение

$b(n)$, формирует заключение о наличии или отсутствии дефекта. Синаптические веса перцептрона $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_7$ настраиваются по алгоритму коррекции ошибки. Экспертная оценка выполняется по правилам: если $\omega^T(n) \cdot x(n) \geq 1$, прогнозируется наличие дефекта; если $\omega^T(n) \cdot x(n) \leq 0$, прогнозируется отсутствие дефекта. Обучение модели на выборке, подготовленной с привлечением базовой методики, позволило рассчитать матрицу синаптических весов $\omega^T(n) = [-14 \ 5,691 \ 1,551 \ 5,636 \ -0,362 \ 11,48 \ -2,711 \ 10,32]^T$. Проверка модели на множестве примеров подтвердила ее применимость для распознавания дефектов в СТ. Отмечено, что практически во всех случаях модель ИНС дает большую точность в распознавании дефектных СТ, чем базовая методика. На рис.5 представлена иллюстрация работы модели однослойного перцептрона по формированию классов состояний СТ.

Многослойная ИНС позволяет решать задачи по распознаванию линейно – неразделимых классов, так как повышает порядок уравнения, описывающего гиперповерхность раздела классов состояний.

В диссертации проведены исследования по выбору оптимальной (в смысле достоверности диагноза) архитектуры многослойной ИНС. Вычислительные эксперименты, прежде всего, были направлены на поиск необходимого количества скрытых слоев и количества нейронов в каждом слое, на оценку достаточного объема обучающей выборки, количества обучающих итераций и т.п. Во всех случаях использовалась обучающая выборка 1340 протоколов ХАРГ СТ

110 кВ (98 единиц) филиала «Восточные электрические сети» либо ее отдельные блоки.

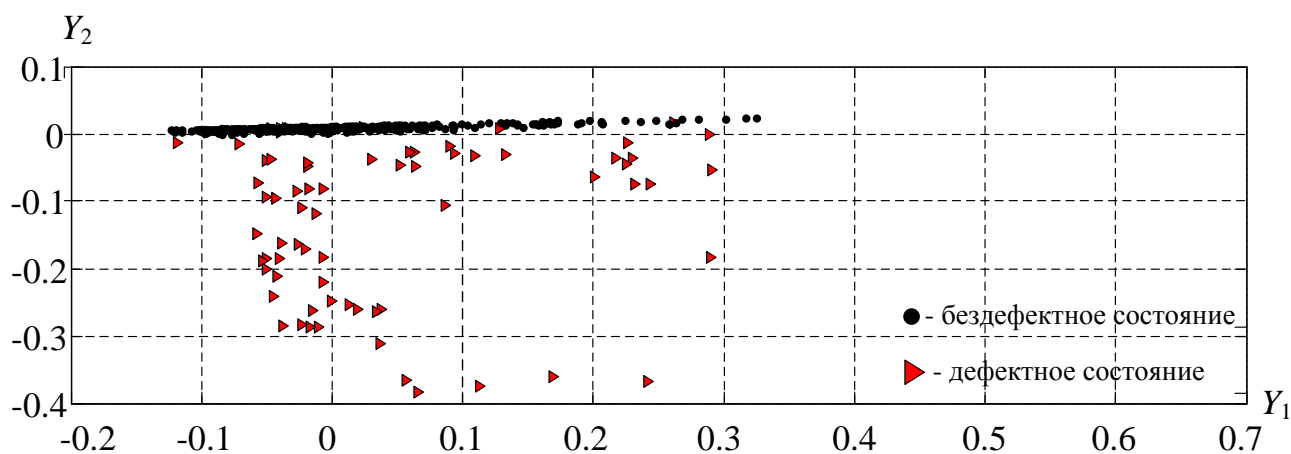


Рис. 5. Формирование классов состояний СТ по модели персептрона

Качество обучения ИНС проверялось на тестовой выборке, содержащей 455 протоколов ХАРГ за 2006 год, которая не участвовала в обучении. В результате предложена оптимальная конфигурация многослойной ИНС прямого распространения 7-14-10-4 с двумя скрытыми слоями, семью входами и четырьмя выходами, которая обеспечивает решение комплексной задачи по одновременному определению наличия развивающегося в СТ дефекта и уточнению его вида по результатам ХАРГ. В табл.2. приведены коды сигналов выходного слоя полученной модели. Суммарная ошибка определения вида развивающегося дефекта по тестовой выборке не превышает 5%, что позволяет констатировать хорошее качество распознавания.

Таблица 2

Кодирование сигналов выходного слоя модели

Возможные комбинации	Выходной нейрон 1	Выходной нейрон 2	Выходной нейрон 3	Выходной нейрон 4
Норма	-1	-1	-1	-1
Наличие дефекта	1	-1	-1	-1
Дефект вида «разряд»	1	1	-1	-1
Дефект вида «перегрев»	1	-1	1	-1
Дефект вида «разряд и перегрев»	1	-1	-1	1

Разработанная модель многослойной ИНС реализована в виде алгоритма для применения в АСМиД СТ. Структура алгоритма имеет две ветви, одна из которых формирует сеть на начальном этапе и настраивается в зависимости от процессов в СТ. Вторая постоянно оценивает состояние СТ и выдает сигнал на переобучение и перерасчет параметров модели ИНС.

В четвертой главе приводится разработка моделей и критериев оценки надежности и оптимизации эксплуатационных процессов СТ. Такие модели должны содержать связь параметров состояния объектов с характеристиками их эксплуатационной надежности, что позволило бы расширить возможности

формализованного описания эксплуатационных процессов. В диссертации предложено в качестве одного из показателей эксплуатационной надежности СТ использовать параметр потока дефектов ω_d , расчет которого производится по результатам диагностирования (статистика ХАРГ) с применением разработанных моделей распознавания (табл.3.). Разработана методика статистической обработки диагностической информации и расчета параметров эксплуатационной надежности обследуемых СТ.

По разработанной методике получен и исследован осредненный годовой график вероятностей выявления дефектных СТ 110 кВ по статистике ХАРГ за период 10 лет (рис.6.). При помощи полученной зависимости можно судить о влиянии некоторых эксплуатационных факторов на показатели надежности СТ. Исследованием установлено, что наиболее опасными по интенсивности возникновения дефектов у СТ обследуемой группы являются периоды межсезонья (апрель, сентябрь) с характерными резкими перепадами температур и изменением электрических нагрузок. Это подтверждает практика эксплуатации СТ.

Таблица 3

Значения параметра потока дефектов СТ

Состояние СТ	Восточные электрические сети		Ноябрьские электрические сети	
	$\omega_d(t), \text{год}^{-1}$	$T_d = \omega_d^{-1}, \text{год}$	$\omega_d(t), \text{год}^{-1}$	$T_d = \omega_d^{-1}, \text{год}$
Дефект	0,186	5,376	0,051	19,61
«разряд»	0,043	23,256	0,012	83,33
«перегрев»	0,075	13,33	0,028	35,714
«разряд и перегрев»	0,092	10,87	0,019	52,63

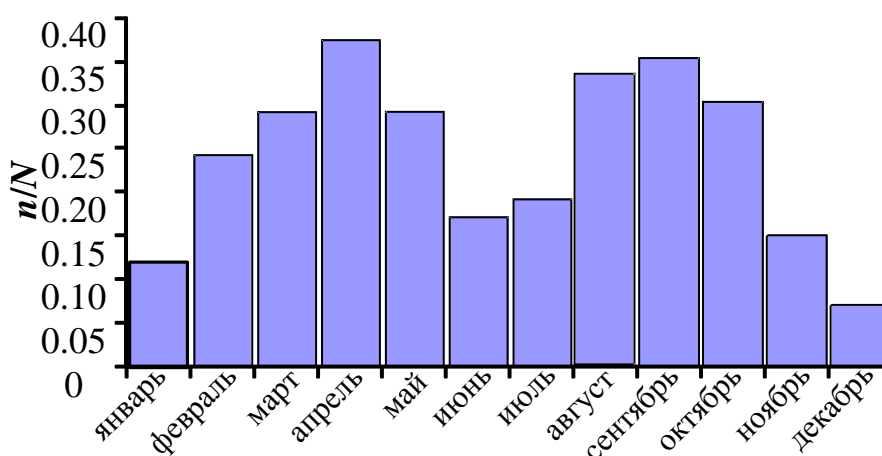


Рис.6. Годовой график вероятностей выявления дефектных СТ по решающему правилу $G > G_{гр}$

В диссертации произведено описание процессов эксплуатации СТ как случайных процессов, в общем случае обладающих свойствами стационарности и однородности. Такая идеализация процессов позволяет использовать однородные марковские модели с непрерывным временем. Однако их применение оправдано только для «не стареющих» систем с постоянным по величине пара-

метром потока отказов (ω), что с определенным допущением соответствует СТ со сроком службы 5-15 лет. Значительная часть эксплуатируемого парка СТ относится к категории «стареющих» систем со сроком службы близким или превышающим нормативный. Для таких трансформаторов на интервале наблюдения ΔT параметр потока отказов есть монотонно-возрастающая функция времени $\omega(t) = \omega_0 + kt$ (ω_0 – начальное значение; k – коэффициент, характеризующий темпы старения СТ). Указанное ограничение можно преодолеть одним из двух способов: уменьшить ΔT до величины, при которой $k \approx 0$, и воспользоваться возможностями марковских процессов, либо использовать полумарковские процессы, для которых время пребывания элемента или системы в j -м состоянии имеет произвольные функции распределения. В диссертации на основе полумарковских случайных процессов разработаны модели обслуживания СТ для нескольких наиболее характерных стратегий управления: предупредительного обслуживания и обслуживания по состоянию.

Особенностью стратегии предупредительного обслуживания является проведение периодических профилактик с целью поддержания требуемого уровня надежности СТ. При возникновении внезапного отказа СТ переводится в состояние аварийного ремонта для восстановления работоспособности и надежности. По завершении профилактики или аварийного восстановления СТ переводится в работоспособное состояние. Очевидно, что периодичность профилактик оказывает определяющее влияние на эксплуатационные характеристики оборудования и на величину суммарных эксплуатационных затрат, точнее на соотношения затрат на профилактику оборудования для поддержания необходимого уровня надежности и затрат на ее восстановление после отказа. Таким образом, оптимизация указанной стратегии ТОиР состоит в выборе периодичности профилактик T , соответствующей экстремуму одного из показателей эффективности управления: максимуму надежности или минимуму эксплуатационных затрат. На рис.7. представлен граф состояний, для которого получены аналитические зависимости от T таких показателей надежности СТ, как

средняя наработка на аварийное $\bar{T}_H = \frac{1 + T^{-1} \cdot T_{ПО}}{\omega}$ и плановое $\bar{T}'_H = \frac{1 + \omega \cdot T_{AB}}{T^{-1}}$

отключение. Здесь $T_{ПО}$ и T_{AB} - продолжительности профилактического обслуживания и аварийного восстановления.

Анализ полученных зависимостей позволяет установить, что с увеличением периодичности профилактик (T) наработка на аварийный отказ системы (\bar{T}_H) уменьшается, а наработка на профилактическое обслуживание (\bar{T}'_H) наоборот увеличивается (рис.8.). Суммарные эксплуатационные затраты сетевой компании представляют собой интегральный показатель эффективности управления обслуживанием СТ на некотором интервале эксплуатации ΔT :

$$Z(T) = \left[\frac{C_{AB}}{C_{ПО}} \cdot \bar{\omega}_H(T) + \bar{\omega}'_H(T) \right] \cdot C_{ПО} \cdot \Delta T,$$

где $C_{ПО}$, C_{AB} - средние стоимости профилактического и аварийного ремонтов (руб./откл.), $\bar{\omega}'_H(T)$, $\bar{\omega}_H(T)$ - соответствующие им частоты плановых и аварий-

ных отключений (откл./год).

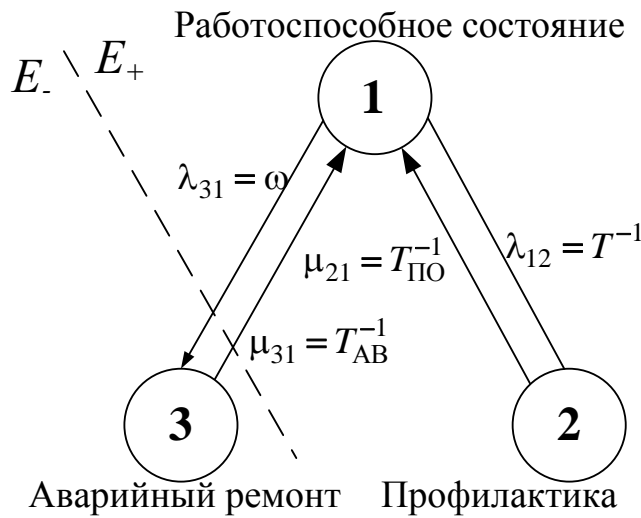


Рис.7. Граф состояний для модели предупредительного обслуживания

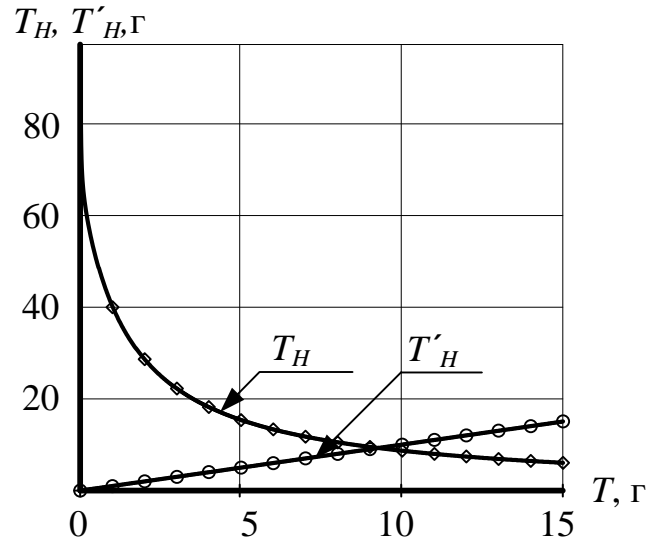


Рис.8. Зависимости $T_H(T)$ и $T'_H(T)$

Максимум вероятности работоспособного состояния $\pi_1(T) = \left[1 + \frac{T_{ПО}}{T} + \omega T_{АВ} \right]^{-1}$ также служит показателем эффективности управления обслуживанием СТ. В соответствии с ним оптимальная периодичность профилактик $T_{опт} = \sqrt{\frac{T_{ПО}}{k \cdot T_{АВ}}}$ зависит только от темпов старения и продолжительности ремонтов.

Разработанная в диссертации методика позволяет рассчитать оптимальные периодичности профилактического обслуживания для каждого из критериев эффективности и выбрать более предпочтительную, исходя из конкретных условий.

Принципиальным отличием стратегии обслуживания СТ по фактическому состоянию является проведение профилактик по необходимости, определяемой в результате диагностирования. Именно диагностирование приобретает ключевое значение в реализации стратегии обслуживания по фактическому состоянию. В диссертации с использованием предложенного подхода разработана модель данной стратегии (рис.9.).

Полученные зависимости средних наработок на аварийный и плановый ремонты от периодичности диагностирования (T) характеризуют монотонность исследуемых эксплуатационных процессов:

$$\bar{T}_H = \frac{T + T_d + q_2 \cdot T_{ПО}}{q_3 + \omega_0 \cdot T + k \cdot T^2}; \quad \bar{T}'_H = \frac{T + T_d + (q_3 + \omega_0 T + k \cdot T^2) \cdot T_{АВ}}{q_2}$$

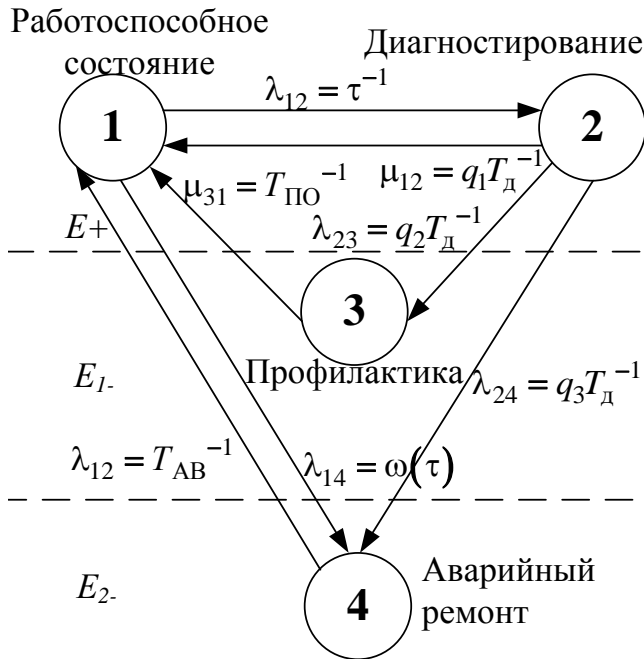


Рис.9. Граф состояний для модели обслуживания по состоянию

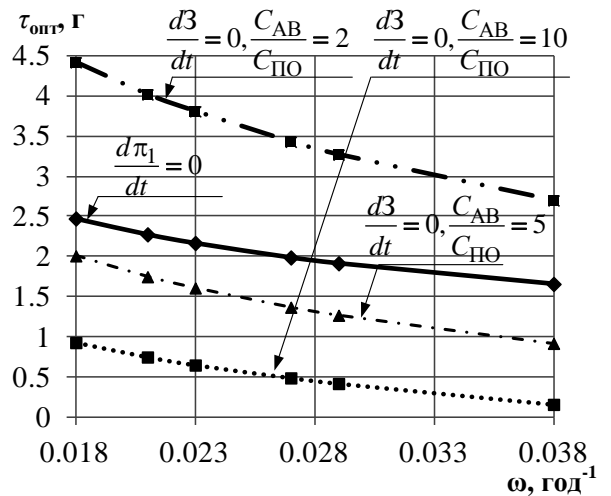


Рис. 10. Выбор $T_{\text{опт}}$ для СТ 6/0,4 кВ

Параметры модели q_1, q_2, q_3 – задаются экспертно и представляют собой соответственно вероятности того, что в межконтрольный период T дефект не возникнет, возникнет, но не успеет развиться до отказа, возникнет и успеет перейти в отказ. Экстремумы функций $\frac{d\pi_1}{dT} = 0$ и $\frac{dZ}{dT} = 0$ формируют область оценок оптимальной периодичности диагностирования СТ, ограниченную двумя критериальными кривыми. Интервал между верхней и нижней границами области зависит от соотношения стоимостей аварийного и профилактического ремонтов и сокращается с ростом интенсивности старения оборудования. На рис.10. представлены области оценок $T_{\text{опт}}$ для СТ 6/0,4 кВ различных сетевых районов ООО «Ноябрьскэнергонепфть» при: $T_d=5$ ч., $T_{\text{ПО}}=40$ ч., $T_{\text{АВ}}=240$ ч., $q_1=0,85$ о.е., $q_2=0,14$ о.е., $q_3=0,01$ о.е. Согласно полученным результатам с уменьшением вероятности не обнаружения дефектов (q_1), область оценок сужается, а оптимальная периодичность диагностирования убывает.

Разработанный комплекс моделей и методик использован сетевой компанией ООО «Ноябрьскэнергонепфть», осуществляющей электроснабжение потребителей нефтедобычи на территории ЯНАО, для оценки обоснованности принятой стратегии эксплуатации трансформаторного оборудования. Учет реальной статистики аварийных отключений при определении ω позволил скорректировать периодичности диагностического и профилактического обслуживания СТ-35/6 и 6/0,4 кВ по отношению к нормативно принятым значениям (табл.4.).

Результаты сравнения значений $T_{\text{опт}}$

Оборудование	Периодичность по РД153-39.1Р-121-02, год			$T_{\text{опт}}$ по разработанным моделям, год	
	Осмотр	ТО	Текущий ремонт	Диагностирование	Текущий ремонт
Трансформаторы напряжением 35/6 кВ	0,083	1	2	0,5 – 1,5	3
Трансформаторы напряжением 6/0,4 кВ	0,5	0,5	2	0,4 – 2,0	3

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ существующих методов и моделей надежности и технического обслуживания сложных систем, в том числе электрооборудования ЭЭС. Отмечено отсутствие достаточно универсальных подходов для решения всего комплекса задач повышения эффективности эксплуатации СТ.

2. Выполнено статистическое исследование экспериментальных выборок измеренных концентраций диагностических газов, растворенных в масле эксплуатируемых силовых трансформаторов. Подтверждены гипотезы об однородности выборок и нормальности распределения случайных переменных, что позволило сформировать критерий наилучшей линейной делимости классов состояний СТ и повысить достоверность их распознавания по результатам ХАРГ.

3. Создан комплекс решающих правил, моделей и алгоритмов для распознавания наличия и вида развивающихся в СТ дефектов, основанный на использовании возможностей статистической теории распознавания образов и искусственных нейронных сетей. С помощью вычислительных экспериментов проверена адекватность разработанных моделей.

4. Получена оптимальная архитектура и параметры нейронных сетей для решения задачи распознавания дефектного состояния СТ.

5. Разработана методика оценки параметров эксплуатационной надежности СТ, использующая статистику аварийных отключений и результатов диагностирования, а также модели расчета оптимальной периодичности обслуживания СТ, учитывающие комплексный критерий «затраты-надежность». Подтверждена целесообразность использования параметра потока дефектов СТ в качестве одного из информативных показателей эффективности их эксплуатации.

6. Произведены расчеты оптимальной периодичности диагностирования и профилактического обслуживания СТ для большого количества реальных примеров. Результаты расчетов, полученные по разработанным моделям, в сравнении с указаниями нормативных документов позволили подтвердить их достоверность и пригодность для решения поставленных задач.

7. Выполнена адаптация предложенных моделей и методики для использования при разработке программно-алгоритмического обеспечения АРМ экс-

платационного персонала предприятия электрических сетей, а также в АСМиД СТ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузьмина, Д. В. Автоматизация мониторинга силовых трансформаторов [Текст] / Д. В. Кузьмина, В. М. Левин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск : Изд-во НГАВТ, 2009. – № 1. – С. 173–176.

2. Танфильева, Д. В. Повышение эффективности управления процессами эксплуатации оборудования электрических сетей [Текст] / Д. В. Танфильева, В. М. Левин // Науч. вест. НГТУ. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – № 2(43). – С. 135–146.

3. Танфильева, Д. В., Оптимизация эксплуатационного обслуживания оборудования электрических сетей [Текст] / Д. В. Танфильева, В. М. Левин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск : Изд-во НГАВТ, 2011. – №2. С. 271-274.

Научные публикации в других изданиях:

4. Кузьмина, Д. В. Модель расходования эксплуатационного ресурса технического устройства [Текст] / Д. В. Кузьмина // Энергетика: экология, надежность, безопасность : тр. VII Всерос. науч.-практ. семинара. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2005. – С. 60–62.

5. Кузьмина, Д. В. Критерии экономической эффективности при оптимизации надежности электрооборудования [Текст] / Д. В. Кузьмина // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых : в 7 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2005. – Ч. 3. – С. 112–114.

6. Кузьмина, Д. В. Оценка эксплуатационной надежности силовых трансформаторов по результатам ХАРГ [Текст] / Д. В. Кузьмина, В. М. Левин // Изв. высш. учеб. заведений Северо-Кавказский регион. Техн. науки. Прил. №15. Диагностика энергооборудования. – Новочеркасск : Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2006. – С. 28–30.

7. Кузьмина, Д. В. Моделирование показателей надежности силовых трансформаторов с учетом влияния эксплуатационных факторов [Текст] / Д. В. Кузьмина // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых : в 7 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – Ч. 3. – С. 197–199.

8. Кузьмина, Д. В. Моделирование и анализ пространства признаков при распознавании дефектных трансформаторов по статистике ХАРГ [Текст] / Д. В. Кузьмина // Энергетика: экология, надежность, безопасность : тр. IX Всерос. науч.-техн. семинара. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2007. – Т. 1. – С. 146–149.

9. Кузьмина, Д. В. Распознавание дефектов в силовых трансформаторах с использованием искусственных нейронных сетей [Текст] / Д. В. Кузьмина // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых : в 7 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. – Ч. 3. – С. 171–173.

10. Кузьмина, Д. В. Распознавание вида дефектов силовых трансформаторов по результатам хроматографии [Текст] / Д. В. Кузьмина, В. М. Левин // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования : материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – С. 181–182.

11. Кузьмина, Д. В. Оценка и прогнозирование эксплуатационного ресурса силовых трансформаторов при обслуживании по состоянию [Текст] / Д. В. Кузьмина, В. М. Левин, Ю. А. Секретарев // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования : материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – С. 177–179.

12. Кузьмина, Д. В. Моделирование оптимальной периодичности диагностирования силовых трансформаторов [Текст] / Д. В. Кузьмина // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых : в 7 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – Ч. 3. – С. 123–125.

13. Кузьмина, Д. В. Определение экономически обоснованной периодичности диагностирования трансформаторов при обслуживании по состоянию [Текст] / Д. В. Кузьмина, В. М. Левин // Энергетика: экология, надежность, безопасность : материалы 15 Всерос. науч.-техн. конф. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – С. 21–23.

14. Кузьмина, Д. В. Особенности эксплуатации силовых трансформаторов в распределительных сетях 6 – 10 кВ нефтепромыслов [Текст] / Д. В. Кузьмина, В. М. Левин // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск : Изд-во НГТУ. – 2009. – № 4(58). – С. 65–70.

15. Танфильева Д. В. Оптимизация периодичности диагностирования трансформаторов для эффективного обслуживания по фактическому состоянию [Текст] / Д. В. Танфильева // Современные техника и технологии : сб. тр. XVI междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : в 3 т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. – Т. 1. – С. 118–119.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс. (383) 346-08-57

формат 60 X 84/16, объём 1.5 п.л., тираж 100 экз.

заказ № подписано в печать ____ .04.2012 г.