

На правах рукописи



Тихонов Валерий Алексеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАТОРОВ
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 10 – 220 кВ
АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Братский государственный университет»,

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Игнатъев Игорь Владимирович

Официальные оппоненты: **Худоногов Анатолий Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Иркутский государственный
университет путей сообщения», кафедра
«Электроподвижной состав», профессор

Кузьмин Сергей Васильевич
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный
университет», кафедра «Электрификации горно-
металлургического производства», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Защита диссертации состоится «26» июня 2019 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: <http://sfu-kras.ru> ФГАОУ ВО Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан «___» мая 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Надёжность и безаварийность систем электроснабжения напряжением 10 – 220 кВ предприятий алюминиевой промышленности во многом определяет качество и объём выпускаемой продукции. Эффективность эксплуатации определяется увеличением времени безаварийной работы и снижением времени на проведение ремонтных работ.

Статистика указывает на то, что около 40% аварийных отключений в системах электроснабжения можно было бы избежать при проведении своевременных и обоснованных ремонтов на основе эффективных методов сбора и анализа эксплуатационных параметров оборудования.

Значительный вклад в исследование и разработку методик, методов и алгоритмов расчёта и планирования профилактических работ на электрооборудовании внёс известный учёный – Кудрин Б.И.

Совершенствование эффективных методов сбора и анализа эксплуатационных параметров электрооборудования и трансформаторов является актуальной задачей, решение которой позволит своевременно оценить эксплуатационный ресурс и синхронизировать время планово-профилактических и текущих ремонтов с минимальными потерями выпускаемой продукции.

Цель работы: совершенствование методов эксплуатации электрооборудования и трансформаторов в части организации и планирования текущих и планово-предупредительных ремонтов, основанных на развитии способов сбора и анализа технических и эксплуатационных параметров.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основе теории графов разработать статистический метод для эффективного сбора и анализа информации по текущему состоянию электрооборудования и трансформаторов.

2. Проанализировать отказы и простои оборудования, связанные с аварийными отключениями в системах электроснабжения напряжением 10 - 220 кВ предприятий алюминиевой промышленности, и оценить эффективность существующих методов сбора эксплуатационных параметров электрооборудования и трансформаторов, а на их основе обосновать рациональные сроки проведения планово-профилактических ремонтов.

3. Усовершенствовать механизм самообучения экспертного регулятора для повышения достоверности вывода о ремонтпригодности электрооборудования.

4. Разработать рациональный подход к ремонту электрооборудования и трансформаторов на основе системы КАНБАН.

5. Определить время и диапазон регулирования силы тока электролиза для минимизации проведения ремонтных работ и проанализировать эффективность усовершенствованного метода по результатам практического внедрения.

Объект исследования: системы электроснабжения напряжением 10 - 220 кВ алюминиевых заводов.

Предмет исследования: эксплуатационные параметры электрооборудования и трансформаторов, методы сбора и анализа данных параметров и рационализация периодов и времени планово-профилактических и текущих ремонтов.

Методы исследования. В работе использованы методы теории электрических цепей и электрических измерений, теории электрических машин и трансформаторов, численные методы решения уравнений при моделировании переходных процессов в электрических схемах замещения с помощью программного обеспечения АСК, методы математической статистики, теория графов.

Научная новизна:

1. Разработан комплексный метод для сбора и анализа информации о текущем состоянии электрооборудования и трансформаторов для обоснования рациональных планово-профилактических работ, включающий:

- оценку технического состояния электрооборудования на основе экспертного регулятора;
- определение рациональной организации ремонтных работ электрооборудования с использованием системы КАНБАН;
- определение рационального периода ремонта электрооборудования с учётом часов максимума энергосистемы.

2. Установлена закономерность использования теории графов, что для получения достоверного прогноза о состоянии электрооборудования необходимо иметь нечётное количество чётных вершин графа знаний, что позволяет осуществлять самообучение экспертного регулятора.

Практическая значимость:

1. Разработанный метод оценки эксплуатационных параметров электрооборудования и трансформаторов напряжением 10 - 220 кВ позволяет получить достоверную информацию об их техническом состоянии и обоснованно выбрать рациональный срок проведения ремонтных работ.

2. Усовершенствованный метод на основе теории графов позволил наиболее качественно получить информацию об эксплуатационном состоянии электрооборудования.

3. Усовершенствованный метод организации ремонтных работ на основе системы КАНБАН позволяет сократить время ремонта и повысить качество работ за счёт максимально возможного использования параллельности этапов работ при выполнении ремонтов.

4. Определены рациональные периоды ремонта электрооборудования и трансформаторов с учётом часов максимума энергосистемы, что позволяет сэкономить средства на оплату электроэнергии.

5. Определены время и диапазон регулирования силы тока электролиза для минимизации периода проведения ремонтных работ с учётом часов максимума энергосистемы.

6. Результаты работы могут быть распространены на предприятия чёр-

ной металлургии и химической промышленности.

Реализация полученных результатов. Разработанные методы оценки эксплуатационных параметров электрооборудования и трансформаторов напряжением 10 - 220 кВ и метод организации ремонтных работ на основе системы КАНБАН используются для определения рациональных сроков и повышения качества ремонтных работ на следующих предприятиях компании РУСАЛ: ПАО «РУСАЛ-Братск», ПАО «РУСАЛ-Братск» филиал в городе Шелехов, АО «РУСАЛ Саяногорск».

Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров по электротехническим специальностям в ФГАОУ ВПО СФУ ИГДГиГ.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается совпадением расчетных значений чёткого вывода о необходимости и сроках выполнения ремонтных работ с реальными сроками проведения планово-предупредительных работ и текущими ремонтами электрооборудования и трансформаторов в цехе электрообеспечения ООО «ИСО» предприятий: ПАО «РУСАЛ-Братск», ПАО «РУСАЛ-Братск» филиал в городе Шелехов», АО «РУСАЛ Саяногорск».

На защиту выносятся:

1. Закономерность нечётности количества чётных вершин графов знаний, позволяющих получить достоверный прогноз о техническом состоянии электрооборудования и трансформаторов напряжением 10 – 220 кВ и обеспечить самообучаемость экспертного регулятора.

2. Усовершенствованная методика определения периода ремонта электрооборудования с учетом часов максимума энергосистемы, позволяющая сэкономить средства на оплату электроэнергии.

3. Усовершенствованный метод организации ремонтных работ на основе системы КАНБАН, позволяющий сократить время ремонта за счёт параллельности выполнения операций в зависимости от типа электрооборудования и повысить качество ремонта.

4. Разработанный комплексный метод сбора и анализа информации для обоснования планово-предупредительных и текущих работ, включающий: оценку технического состояния электрооборудования на основе операционного регулятора; определение рациональной организации ремонтных работ электрооборудования с использованием системы КАНБАН; определение рационального периода ремонта электрооборудования с учётом часов максимума энергосистемы.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: XI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых (г. Владивосток, 20-24 апреля, 2009 г.); VIII (XXX) Всероссийская научно-техническая конференция «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири» (г. Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009 г.); Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и Современные наукоёмкие технологии» (10-17 апреля Израиль, 2010 г.); IX (XXXI) Всерос-

сийская научно-техническая конференция «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири» (г. Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010 г.); Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и современные наукоёмкие технологии» (2-9 августа Испания, 2010 г.); X (XXXII) Всероссийская научно-техническая конференция «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири» (18-22 апреля, г. Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2011 г.); XI (XXXIII) Всероссийская научно-техническая конференция «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири» (16-20 апреля, г. Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2012 г.); Международная научная конференция «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (22 мая-2 июня Европа, 2012 г.); Международная научная конференция «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники» (10-17 апреля, Италия, 2012 г.); Международная научная конференция «Актуальные вопросы науки и образования» (21-23 мая, г. Москва, 2012 г.); Международная научная конференция «Наука и образование в современной РОССИИ» (20-21 ноября, г. Москва, 2017 г.); Международная научная конференция «Наука и образование в современной РОССИИ» (17-24 декабря, Италия, Рим, 2017 г.); Международная научная конференция «Наука и образование в современной РОССИИ» (май, г. Москва, 2018 г.) и международная книжная выставка в LIBER BARCELONA 2018 в Испании (3-5 октября, г. Барселона, Испания, 2018 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 18 печатных работ, из которых 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования основных результатов диссертационных исследований на соискание учёной степени кандидата наук; 1 статья в журнале, входящим в международную базу цитирования Scopus, 1 статья в периодическом издании. В каждой работе, опубликованной в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 50%.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 78 наименований. Основной текст диссертационной работы изложен на 120 страницах, содержит 27 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, даётся общая характеристика работы, сформулированы цели и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость, отражены вопросы реализации и апробации научных результатов, сформулированы основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ различных систем управления и диагностики электрооборудования. Рассмотрены применения различных экспертных систем и регуляторов для повышения качества результатов и выводов выполненной диагностики электрооборудования. Проведён анализ отказов в работе высоковольтного электрооборудования ПАО «РУСАЛ Братск» с учётом

его диагностики. Результат анализа отказов в работе высоковольтного оборудования за 2016 год (рисунок 1) показал, что при увеличении числа диагностических измерений улучшается представление данных о состоянии электрооборудования, тем самым прогнозируется дальнейшая его эксплуатация.

Системы диагностики электрооборудования являются составной частью систем управления электрообъектами. Качественный анализ систем управления электрообъектами позволяет определить направление по усовершенствованию систем сбора и анализа эксплуатационных параметров электрооборудования и трансформаторов в системах электроснабжения 10-220кВ алюминиевой промышленности. Данная цель может быть достигнута при использовании качественных методов, определяющих текущее состояние электрооборудования и трансформаторов и совершенствование организации проведения ремонтных работ.

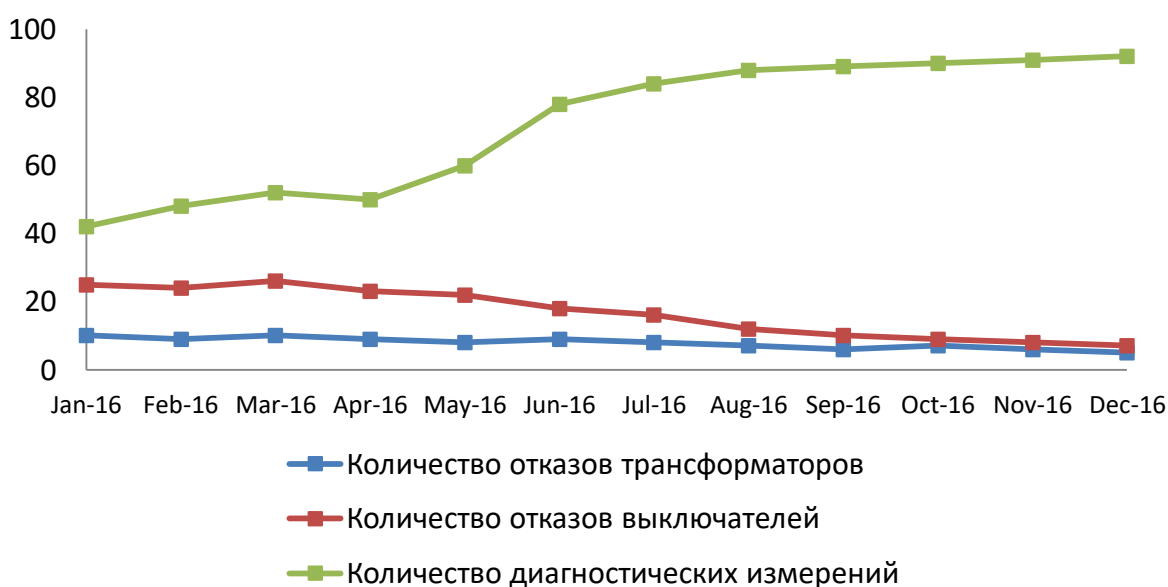


Рисунок 1 – Помесячное распределение отказов трансформаторов и выключателей в зависимости от количества диагностических измерений

Мелкие и средние ремонты составляют 92% от всех ремонтов, что является существенным при выборе методов эксплуатации электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности.

Проведён анализ различных методов представления знаний в интеллектуальных системах. Рассмотрены различные системы управления производственными процессами. Перечислены языки программирования для систем автоматизированного управления производством. В результате выявлено:

1. Использование экспертного регулятора для диагностики электрооборудования, являющейся слабоформализованной областью науки и техники, где характерна аккумуляция в системе знаний и правил рассуждений опытных специалистов, а также специальной системы объяснений, представляется наиболее рациональной для условий эксплуатации систем электроснабжения 10-220 кВ алюминиевой промышленности при применении механизма самообучения.

2. Приобретаемые типовые знания на основе сложившихся правил не влияют на качество применяемых систем диагностики. Для повышения качества диагностики требуется расширение функциональных возможностей систем диагностики и применение постоянно изменяющихся нетиповых знаний о техническом состоянии электрооборудования для обоснования необходимости проведения ремонтных работ.

3. Основываясь на нечёткой логике, все нетиповые знания приводят к появлению выводов о состоянии электрооборудования.

Во второй главе объяснены структура знаний, процесс их накопления и механизм самообучения экспертного регулятора.

Экспертный регулятор хранит все знания в своей базе знаний. При этом база знаний размещается в графы знаний. Графы знаний построены по типу трехуровневой системы. Первый уровень системы – это вершины графа, имеющие наименования экспертных знаний или правил. Второму уровню соответствуют узлы графа с одним или более наборов условий. Третьему уровню соответствуют сами условия.

В результате целью работы экспертного регулятора является получение вывода о вариантах технического состояния эксплуатируемого оборудования и о вариантах времени его ремонта. В ходе поисков вариантов система осуществляет движение по узлам и рёбрам графа знаний. В случае, когда достигается ряд определённых вершин, система формирует логический вывод, если не достигается ни одной определённой вершины, система констатирует отсутствие знаний, которые бы дали ответ на сложившуюся ситуацию, и выводит неопределённое решение.

Неопределённое решение указывает на необходимость ввода в систему недостающих знаний для формирования логического вывода, то есть создает условия для самообучения. После получения нечеткого вывода экспертная система сохраняет информацию о тех фактах, которые фигурировали в получении нечеткого вывода. Эта информация сохраняется в виде списка фактов и списка вершин графа знаний, на основе которых был сгенерирован нечеткий вывод. Нечеткий вывод - это всего лишь гипотеза, выдвигаемая экспертной системой на основе доступных ей фактов и имеющихся в распоряжении правил.

Для получения нечёткого вывода система задействовала определенное количество правил, получив при этом все необходимые ей факты. Информация о полученных системой фактах и задействованных правилах сохраняется в базе данных системы.

В результате система получит группу правил со скорректированными весами. И чем большее количество коррекций в системе будет происходить, тем более адекватными будут правила системы. После того, как правила в системе были скорректированы, система продолжает хранить информацию о фактах, при которых были задействованы правила, эта информация необходима для самообучения системы.

Стартовая точка работы механизма самообучения экспертной системы наступает сразу после того, как произошла очередная параметрическая опти-

мизация правила экспертной системы. Первым действием механизма самообучения является проверка на наличие подходящих условий в описании правила для этого процесса. Правило может быть рассмотрено в первом приближении как ветвь графа, приведённая на рисунке 2, где N1-N3 – узлы графа знаний, М – нечеткий вывод правила.

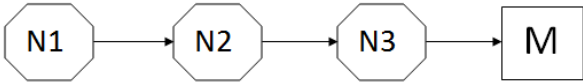


Рисунок 2 - Правило, как элемент графа знаний в экспертной системе

Каждому узлу графа будет соответствовать совокупность наборов условий, которая обеспечивает функцию логического "ИЛИ" как внутри набора условий, так и между наборами условий. Иначе говоря, сформулирована логика: если истинно хотя бы одно из условий для любого из параметров узла N 1, то истиной считается данный узел подграфа знаний.

Далее рассматривается узел подграфа знаний как совокупность условий, связанных между собой логическим отношением "ИЛИ", такая форма представления узла подграфа знаний правомерна, поскольку в данном случае нам не важны названия параметров, которые являются нечисловыми параметрами. Одно правило может охватывать достаточно большое количество ситуаций, например, в правиле, представленном подграфом, состоящим из трех узлов и вершины вывода (рисунок 3), каждый из трех узлов включает в себе 10 альтернативных условий, а вершина вывода имеет 4 альтернативных варианта вывода. Таким образом, получим $4 \cdot 10^3$ ситуаций, в которых данное правило может сработать.

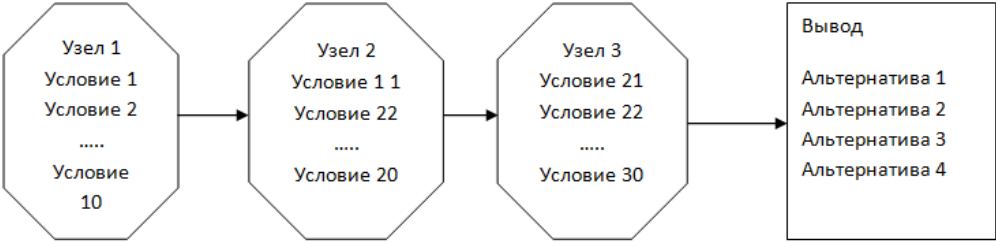


Рисунок 3 - Множество ситуаций, подпадающих под одно правило

При чётком выводе системы используется обычный граф знаний, представленный на рисунке 4. Когда пользователь получает нечеткий вывод, полученный при срабатывании различных правил экспертной системы, появляется новое правило экспертной системы, впоследствии скорректированное пользователем системы на основе соединений оснований – СО, вершин графа. Структура усовершенствованного графа знаний приведена на рисунке 5.

Исследования экспертного регулятора по общепромышленным трансформаторам выполнены в достаточном объёме для принятия решений о необходимости их ремонта или дальнейшей эксплуатации. В то же время

практически отсутствуют данные об исследовании работы экспертного регулятора для диагностики преобразовательных трансформаторов, используемых в технологии электролиза алюминия.

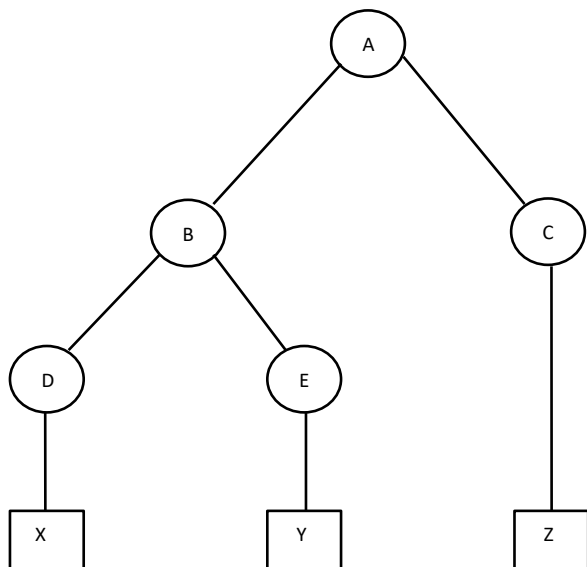


Рисунок 4 – Обычный граф знаний, приводящий к чёткому выводу

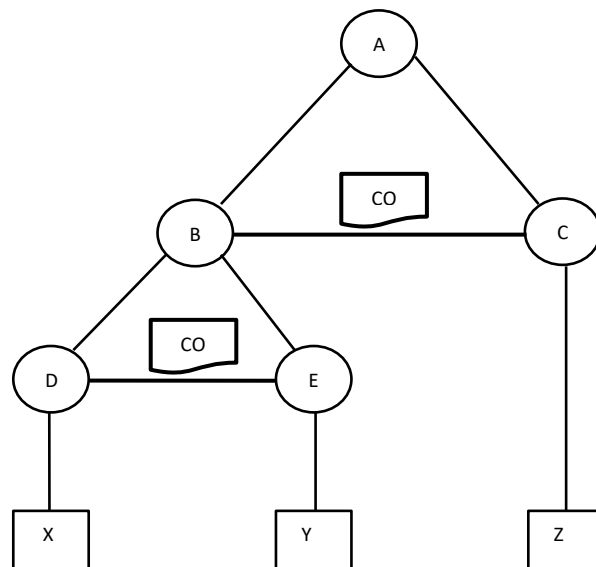


Рисунок 5 – Усовершенствованный граф знаний, решающий процесс самообучения в случае нечёткого вывода

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Применено понятие нечёткого логического вывода для рассмотрения нестандартной аварийной ситуации электрооборудования и трансформаторов, в результате которого потребуется значительно больше времени на получение вывода, чем при стандартной ситуации при чётком выводе;

2. Для получения нечёткого вывода, отражающего нестандартную аварийную ситуацию, предложен подход, заключающийся в нахождении одинаковых условий в наборах условий вершин графа знаний, при котором совпадение хотя бы одного условия является решением для нестандартной аварийной ситуации;

3. Предложен и описан механизм экспертной системы, заключающийся в том, что соединяются основания вершин графа знаний и в результате это позволяет сформировать получение новых правил, повышающих эффективность работы экспертной системы, поддерживающей принятие рациональных решений по необходимости ремонта или продолжения дальнейшей эксплуатации.

4. Для повышения достоверности по использованию экспертной системы при диагностике преобразовательных трансформаторов необходимо выполнить аналитические исследования экспертного регулятора.

В третьей главе приведены структурные схемы диагностики силовых трансформаторов по хроматографическому анализу растворённых в масле газов на базе знаний экспертного регулятора.

В работе приведены разработанные структурные схемы для правил экспертного регулятора, при анализе следующих растворённых в масле газов: водорода (H_2), метана (CH_4), ацетилена (C_2H_2), этилена (C_2H_4), этана (C_2H_6), оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO_2). Пример структурной схемы для анализа концентраций водорода - H_2 представлен на рисунке 6.

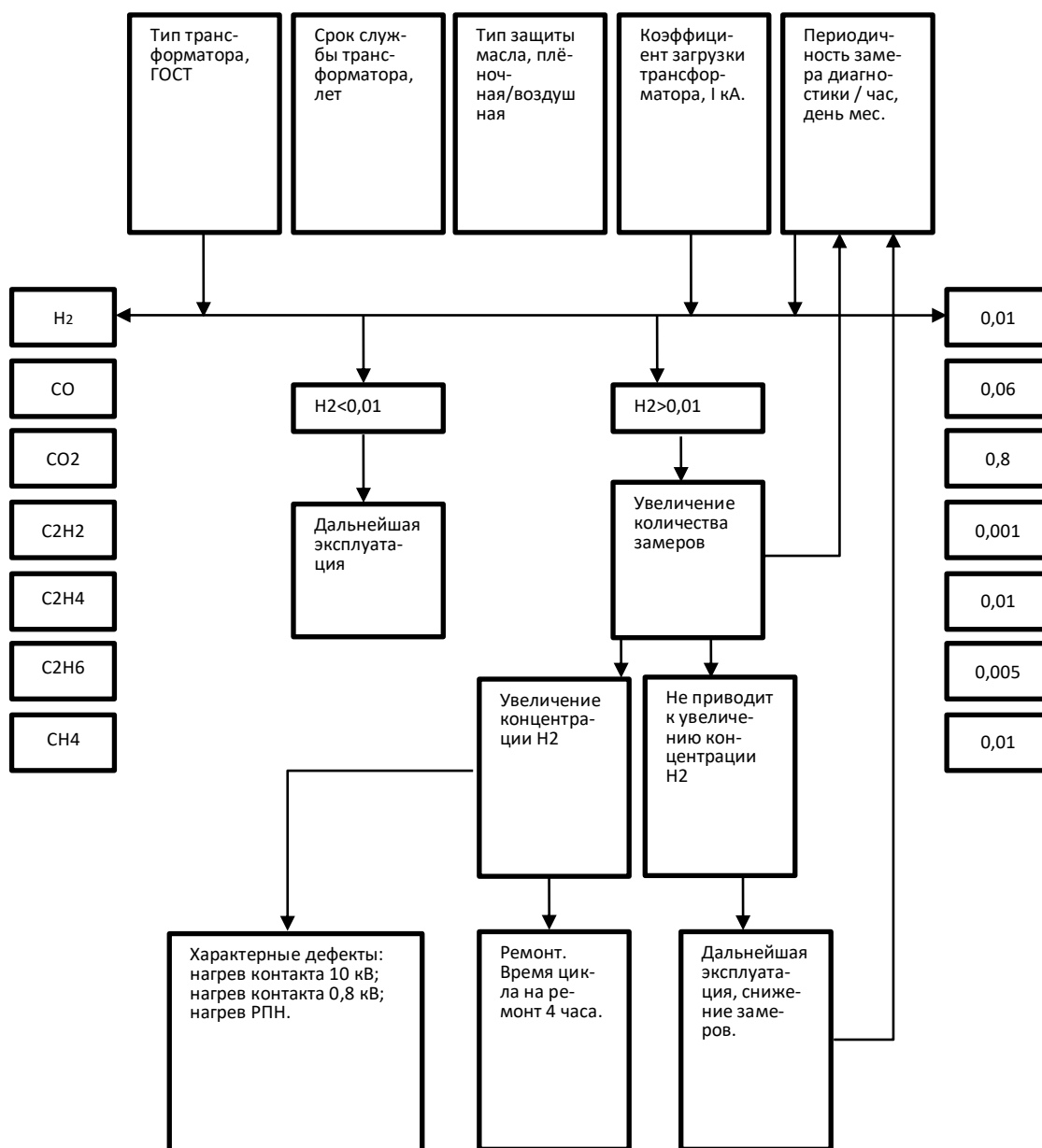


Рисунок 6 – Структурная схема для анализа концентраций водорода H_2

Затем вводим правило, дающее ответ на вопрос, превышает ли газ H_2 предельно допустимую концентрацию для конкретного трансформатора или не превышает.

Опыт эксплуатации и устранения дефектов на преобразовательном трансформаторе показывает, что нечёткий вывод может быть получен при

одновременном сочетании превышений концентраций различных растворённых газов, например – H_2 и C_2H_2 ; CH_4 и CO_2 . Далее приведены структурные схемы для таких сочетаний. При появлении одновременно двух характерных газов H_2 и C_2H_2 вывод о возникшем дефекте чётко сформулировать не представляется возможным (рисунок 7).

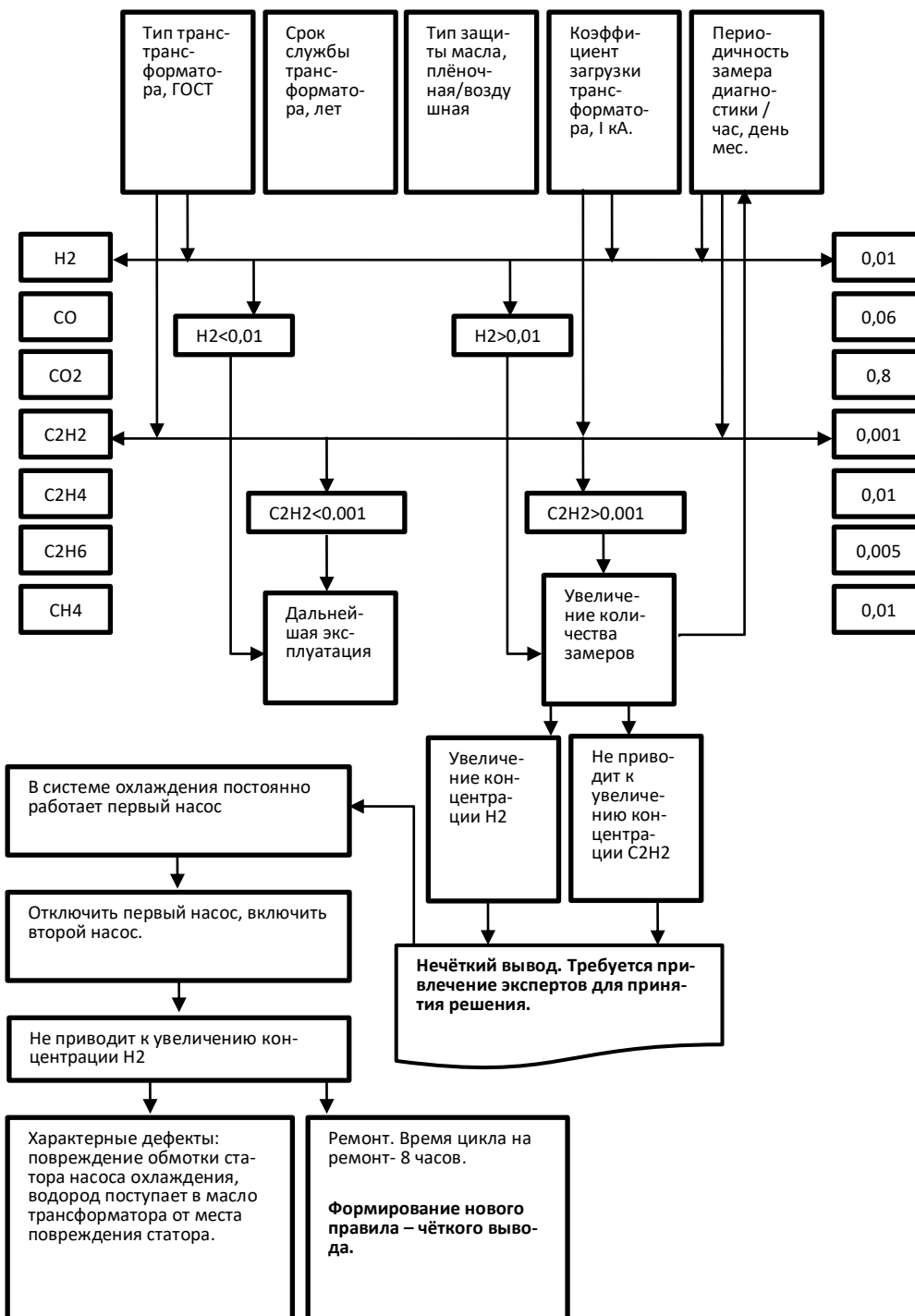


Рисунок 7 – Структурная схема для анализа концентраций водорода H_2 и ацетилена C_2H_2

Экспертный регулятор формирует нечёткий вывод. Затем экспертами решается задача по определению причин возникновения такого дефекта. На основании нечёткого вывода мы вводим правило, дающее ответ на вопрос:

при сочетании превышений газов H_2 и C_2H_2 какой предполагаемый дефект может быть и каково время цикла на его устранение.

На основании данных примеров в базу знаний экспертного регулятора заносятся все случаи формирования сначала нечёткого, а затем чёткого вывода. Таким образом, происходит самообучение экспертной системы и в дальнейшем формирование чёткого вывода будет происходить качественнее. На основании данных принципов был применён алгоритм самообучения и сформирован экспертный регулятор в системе телемеханики КПП ЦЭО ПАО «РУСАЛ Братск».

Одним из выводов экспертного регулятора является параметр времени цикла. Время цикла – это время, за которое возможно провести ремонтные работы, соблюдая нормальную последовательность их выполнения, при этом операции выполняются последовательно одна за другой. Также на предприятиях алюминиевой промышленности существует технологическая определённая производственного процесса. Она определяется временем такта на выполнение конкретной работы. Время такта – это время, отведённое на выполнение ремонтных работ. Оно формируется исходя из технологических особенностей предприятий алюминиевой промышленности и связано напрямую с загрузкой основных мощностей предприятия.

Характерным отличием в структуре времени такта и времени цикла является время на выполнение ремонтов. Поэтому, уменьшая время на выполнение ремонтов, можно снизить время цикла и достигнуть времени такта, тем самым выполнить ремонт в отведённое технологическим периодом время. Для оптимизации ремонтного времени необходимо применить метод организации ремонтных работ КАНБАН, с помощью которого можно достигнуть времени такта при их выполнении. Для этого необходимо провести усовершенствование данного метода при его использовании в ремонтах электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Предложен механизм формирования правил при диагностике растворённых газов в трансформаторном масле, который позволяет накапливать знания, их логически структурировать и применять, заносить информацию в базу знаний экспертного регулятора.

2. Разработаны структурные схемы для анализа растворённых газов в трансформаторном масле для формирования чёткого вывода. Это позволяет экспертному регулятору выдавать решение о дефекте преобразовательного трансформатора, а также о продолжительности ремонтных работ.

3. Разработаны структурные схемы для анализа сочетаний растворённых газов в трансформаторном масле, таких как: H_2 и C_2H_2 ; CH_4 и CO_2 , что позволяет экспертному регулятору сделать нечёткий вывод и определить несколько путей устранения дефекта. По устранению дефекта определяется конкретное сочетание газов и условий их возникновения, данная информация заносится в базу знаний экспертного регулятора, и в дальнейшем она будет распознаваться как чёткий вывод.

4. Для проведения ремонтных работ в требуемой продолжительности необходимо правильно организовать последовательность ремонтных работ и связать их с технологической возможностью производства.

5. Наиболее рациональным подходом к правильной организации ремонтных работ является система оперативного выполнения ремонтов – КАНБАН.

В четвертой главе рассмотрена система рационального управления производством КАНБАН. Как правило, ремонты электрооборудования и трансформаторов 10-220 кВ алюминиевой промышленности выполняются в строгой последовательности всех операций. При этом осуществляется централизованное управление всеми ремонтными работами. Например, при ремонте трансформатора последовательно выполняются все этапы ремонта, начиная от фильтрации трансформаторного масла, разборки трансформатора, выемки активной части, чистки контактов, ремонта обмотки, ремонта РПН, ремонта расширительного бака, ремонта радиаторов охлаждения, ремонта вентиляторов, сборки трансформатора, заливки трансформаторного масла и испытания трансформатора. Сущность системы КАНБАН заключается в децентрализации управления, проявляющейся в том, что во многих случаях ремонт электрооборудования и трансформаторов можно проводить по параллельным схемам.

Необходимо каждый граф заданий в первую очередь разбить по каждому отдельному оператору, по ветви параллельной схемы ремонта. Затем производится замер времени выполнения заданий каждым оператором операции ремонта в целом и составляется диаграмма выполнения заданий с сокращением времени потерь на ремонт отдельных операций. Затем экспертной системой на основе чёткого вывода определяется время цикла на выполнение задания и сравнивается с временем такта на выполнение ремонта. Если время цикла ($T_{\text{цикла}}$) превышает время такта ($T_{\text{такта}}$), то рассчитывается скорректированное время выполнения задания $T_{\text{корректиров}}$:

$$T_{\text{корректир}} = T_{\text{цикла}} - T_{\text{такта}} \quad (1)$$

Таким образом, всё задание приводится к времени такта. Аналогичным способом разбираются задания для каждого оператора и выстраивается диаграмма стандартизированной работы. На ней вырисовываются все операторы и отмечается время такта. Каждому оператору определяется время стандартизированной работы, время ее цикла, время переходов; в первую очередь при ремонте электрооборудования и трансформаторов задействуются параллельные ветви, что позволяет сократить время цикла в 2 раза.

Существующая система КАНБАН очень эффективна для отдельных последовательных операций в ремонте в общем цикле. Учитывая, что основная масса оборудования, используемого в алюминиевой промышленности, может выполняться с максимальным количеством параллельных ветвей, становится очевидным, что сокращение времени параллельной ветви приведёт к общему сокращению времени ремонта.

Таким образом, выполняется такое количество заданий, которое требуется в данное время такта. При большом количестве КАНБАНов возникает

путаница и пересортица их, при малом количестве КАНБАНОВ возможен простой. Одним из способов расчёта оптимального количества КАНБАНОВ является теория массового обслуживания. Оптимальное количество КАНБАНОВ определяется выражением (2)

$$N = (\max \{1, [-\ln(1 - P_l) / \ln F - 1]\}) * k \quad (2)$$

где P_l – заданный высокий уровень (например, 0,95) удовлетворения внешнего спроса; $F = p(1 - q)/q(1 - p)$; q – вероятность спроса на КАНБАНЫ; $F = \{0, 1\}$ – случайный процесс (производительность оборудования); p – вероятность $\{F=1\}$, k – количество параллельных ветвей. Максимальное время для выполнения ремонтов при отключенном оборудовании необходимо выделять в часы максимума нагрузок (время максимальных в течение суток нагрузок, заданное энергосистемой, при котором рассчитывается максимальная оплата за потреблённую мощность предприятием алюминиевой промышленности), при этом если время ремонта превышает часы максимума, то необходимо максимально использовать его диапазон.

Чистый запас времени ремонта $y[t]$ с учётом часов максимума нагрузки равен

$$y[t + 1] = y[t] + x[t] - q[t] \quad (3)$$

где x и q – фактическое производство и спрос на КАЙЗЕНЫ – небольшие улучшения процесса ремонтных работ. Если время цикла превышает время такта, то требуется, как сказано выше, разбить общий процесс ремонта на необходимое количество параллельных процессов и проанализировать время их выполнения, определяя разницу между максимальным и минимальным временем выполнения отдельных операций, потери и причины их возникновения. Затем устранить потери, внедрив улучшения – КАЙЗЕНЫ, например, заменив ручной инструмент пневматическим или электрическим и исключив тяжесть трудового процесса: убрав неудобные позы – поднятые руки, применив подставки для работающих, передвижные тележки и верстаки, – тем самым сократив время цикла, необходимое для использования времени максимальных нагрузок. При этом его отклонение $x[t]$ будет выражено:

$$x[t] = \begin{cases} 0, & y[t] \geq N \text{ или } E[t] = 0; \\ 1, & y[t] < N \text{ или } E[t] = 1, \end{cases} \quad (4)$$

где N – требуемое количество КАЙЗЕНОВ, E – корректирующая функция.

Для обеспечения требуемого времени ремонта необходимо иметь в наличии достаточное количество часто применяемых запасных частей, используемых в 90% случаев. Математическое ожидание объёма запасов $I_2(N)$ будет определено:

$$I_2(N) = \sum_{y=1}^N p(y) = N - \frac{1}{F - 1} + \frac{1}{(F - 1)\{F^N\}} \quad (5)$$

где N и F – количество и спрос на КАЙЗЕНЫ и КАНБАНЫ соответственно. Объём запаса $I_2(N)$ представляет физическое количество часто используемых запасных частей, таких как фильтры маслоочистительных установок, газовые реле, резиновые уплотнения, силикагель и т.п.

Вероятность наличия неудовлетворённого спроса $I_1(N)$ в запасных частях рассчитывается:

$$I_1(N) = \sum_{y=-\infty}^{-1} P(y) = \frac{1}{(F-1)\{F^{N+1}\}}, \quad (6)$$

где $P(y)$ – вероятность нахождения системы в состоянии, превышающем время нахождения в ремонте y , относительно часов максимума.

В этом случае система управления может работать самостоятельно с периодическим контролем. Операторам системы потребуется отвлекаться только на самонастройку входных параметров и сверку промежуточных результатов.

В часы максимума нагрузки для уменьшения платы за электроэнергию происходит плановый сброс нагрузки, то есть снижение силы тока электролиза алюминия. Данный процесс называется модуляцией силы тока. Снижение нагрузки может быть достигнуто с помощью вывода в ремонт электрооборудования и трансформаторов в часы максимума нагрузки. Таким образом, использование часов максимума нагрузки позволяет минимизировать финансовые затраты на выполнение ремонтов электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Чёткий вывод экспертной системы поможет рассчитать главный параметр изучаемой области знаний – время такта. На основании рассчитанного времени удастся выстроить рациональную систему оперативного управления ремонтами электрооборудования КАНБАН с целью сокращения общего времени ремонта.

2. Для сокращения общего времени ремонта необходимо максимально использовать параллельность в ремонте электрооборудования и трансформаторов с учётом часов максимума нагрузки, что отразится на количестве КАНБАНОВ. Для сокращения времени отдельной параллельной ветви ремонтов необходимо определить максимально возможное количество КАЙЗЕНОВ для данной ветви и необходимое количество первостепенного расходного материала для выполнения ремонтов.

3. Необходимо определить экономическую целесообразность использования часов максимума нагрузки при ремонте электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности.

В пятой главе рассмотрены экономические аспекты внедряемых мероприятий. На рисунке 8 приведена структура затрат предприятия алюминиевой промышленности. Как видно из диаграммы статья затрат на электроэнергию является одной из основных и занимает 37%, а так как ежегодно происходит рост тарифов на электроэнергию, то данная статья затрат относится к одной из приоритетных в плане её снижения и оптимизации. Снижение элек-

троэнергии на 1 тонну алюминия можно достичь за счёт использования нижеперечисленных методов:

1) Использование собственной генерации, в первую очередь связанной с восстановлением природных ресурсов, – гидрогенерации, которая многократно ниже по себестоимости выработки электроэнергии, чем на теплоэлектростанциях – ТЭЦ, так себестоимость гидрогенерации равняется 10 копейкам, тогда как на ТЭЦ – 120 копейкам;

2) Внедрение технологий сокращения электроэнергии при её передаче и преобразовании, а также при производстве электролиза алюминия, в качестве которого может выступать эффективное подавление высших гармоник в спектре тока нагрузки; использование глубоких вводов 220/1 кВ; применение глубокой компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения алюминиевых заводов;

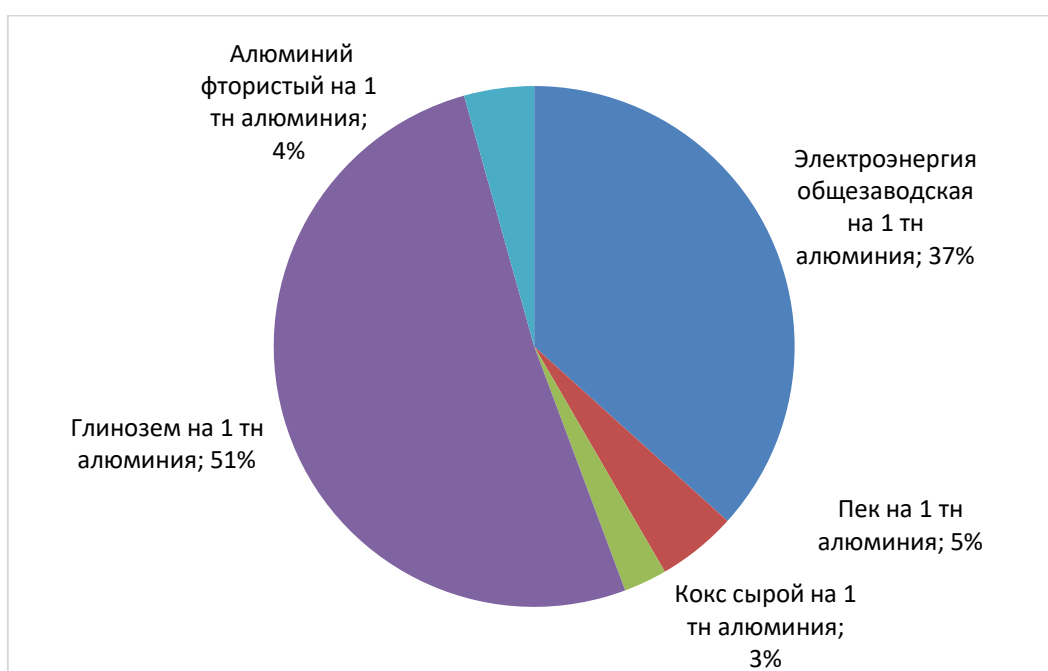


Рисунок 8 – Структура затрат алюминиевого предприятия

3) Снижение нагрузки алюминиевого предприятия в часы максимума энергосистемы (принцип модуляции силы тока). Данная проблема ранее рассматривалась применительно только к технологическому процессу. Однако практически не рассматривались вопросы использования часов максимума для мелкого и среднего ремонтов электрооборудования, требующих их отключения от системы электроснабжения. Данный принцип позволит сократить нагрузку в часы прохождения максимума, а следовательно, позволит существенно снизить затраты при выполнении данных ремонтов, при выполнении их в часы максимума нагрузки либо при их максимальном использовании.

Процесс электролитического получения алюминия происходит с затратой большого количества электрической энергии. На производство 1 тон-

ны алюминия расходуется в среднем 15000 – 18000 кВт·час электрической энергии, а для крупного алюминиевого завода, такого как ПАО «РУСАЛ Братск», необходимо 46 500 000 кВт·час электроэнергии в сутки. При стоимости 1 кВт·часа, равного 137 копейкам, можно рассчитать ежемесячные платежи за потреблённую электроэнергию, которые составят примерно 1,9 млрд.руб. в месяц. Кроме этого, осуществляется плата за мощность, рассчитанная за 1 МВт стоимостью 210 000 руб., равная 1910 МВт·210 тыс.руб. = 401,1 млн.руб. в месяц. Таким образом, суммарная годовая оплата за электроэнергию составит: (1,9 млрд.руб.+0,4011 млрд.руб.)·12=27 613 200 000 руб. Определённое целевое значение регулирование силы тока в 5 кА по каждой серии электролиза принесёт в целом для завода изменение мощности на 10 МВт, то есть ежемесячная экономия в 10 МВт в месяц приведет к снижению оплаты за электроэнергию на сумму 10МВт·210тыс.руб.=2,1 млн.руб.

При одновременном появлении двух характерных газов H_2 и C_2H_2 экспертный регулятор формирует впоследствии чёткий вывод о времени цикла ремонта, равном 8 часам. Затем, применяя систему оперативного ремонта КАНБАН, мы снижаем время ремонта до времени такта, равного 6 часам, – в часы максимума нагрузки с 09:00 до 14:00 и затем выполняем ремонт. При одновременном появлении двух характерных газов CH_4 и CO_2 экспертный регулятор формирует впоследствии чёткий вывод о времени цикла ремонта, равном 7 часам. Затем аналогично первому случаю, применяя систему оперативного ремонта КАНБАН, мы снижаем время ремонта до времени такта, равного 5 часам, в часы максимума нагрузки с 19:00 до 23:00. Тем самым все ремонтные работы мы выполняем в часы максимума нагрузки. В результате проводимой модуляции с одновременным выполнением ремонтов по системе КАНБАН (параллельным способом) выпуск алюминия за сутки не изменится, а глубина модуляции станет больше и составит 20 МВт, что приведёт к экономии в 4,2 млн.руб.

Совмещение модуляции силы тока и проведение ремонтов в часы максимума нагрузки позволяют достичь экономии от общей стоимости электроэнергии в размере 1 % и составляют 276 132 000 руб., что выше, чем весь годовой бюджет цеха по ремонту ЦЭО ПАО «РУСАЛ Братск», сумма которого составляет 231 645 636 руб.

Таким образом, выполнение ремонтных работ с использованием экспертного регулятора и системы КАНБАН в часы максимума нагрузки при совмещении модуляции силы тока позволит как минимум окупать затраты на проведение ремонтных работ.

На основании выше изложенного можно сделать следующие основные выводы:

1. Для снижения себестоимости выпускаемого алюминия необходимо повсеместно использовать принцип модуляции силы тока в часы максимума нагрузки, что позволяет сократить потери мощности на 0,5 %.

2. Наибольшую эффективность в экономии электроэнергии можно достичь за счёт предложенного метода, включающего сочетание модуляции силы тока и выполнение мелко-срочного и среднего ремонта в часы максимума

нагрузки. В этом случае экономия электроэнергии увеличивается почти в два раза и достигает 1% от общей стоимости оплачиваемой электроэнергии.

3. Выполнение ремонтных работ с использованием экспертного регулятора и системы КАНБАН в часы максимума нагрузки при совмещении модуляции силы тока позволит как минимум окупать затраты на проведение ремонтных работ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие основные выводы:

1. Выполненный анализ аварийности преобразовательных трансформаторов и электрооборудования напряжением 10-220 кВ показал, что количество мелко-срочного и среднего ремонтов достигает 92% от общего количества выполненных ремонтов, при этом количество отказов электрооборудования и трансформаторов обратно пропорционально количеству диагностических измерений, поэтому достоверная диагностика электрооборудования и трансформаторов позволит повысить надёжность предприятий алюминиевой промышленности.

2. Усовершенствован метод использования теории графов, для эффективного сбора и анализа информации по текущему состоянию электрооборудования и трансформаторов. Применено понятие нечёткого логического вывода для рассмотрения нестандартной аварийной ситуации электрооборудования и трансформаторов. Для получения нечёткого вывода, отражающего нестандартную аварийную ситуацию, предложен подход, заключающийся в нахождении одинаковых условий в наборах условий вершин графа знаний, при котором совпадение хотя бы одного условия является решением для нестандартной аварийной ситуации. Предложен усовершенствованный механизм экспертной системы, при котором соединяются вершины графа знаний, что позволяет сформировать получение новых правил, повышающих эффективность работы экспертной системы, поддерживающей принятие рациональных решений по необходимости ремонта или продолжения дальнейшей эксплуатации.

3. Разработаны структурные схемы для анализа растворённых газов в трансформаторном масле для чёткого и нечёткого выводов. На основании этого предложен механизм формирования правил при диагностике растворённых газов в трансформаторном масле, который позволяет накапливать знания, их логически структурировать и применять, заносить информацию в базу знаний экспертного регулятора.

4. Наиболее рациональным подходом к проведению организации ремонтных работ является система КАНБАН, адаптированная к условиям производства алюминия.

5. Чёткий вывод экспертной системы поможет рассчитать главный параметр изучаемой области знаний – время такта. На основании рассчитанного времени удастся выстроить рациональную систему оперативного управления

ремонтами электрооборудования КАНБАН с целью сокращения общего времени ремонта.

6. Для сокращения общего времени ремонта необходимо максимально использовать параллельность в ремонте электрооборудования и трансформаторов с учётом часов максимума нагрузки, что отразится на количестве заданий. Для сокращения времени отдельной параллельной ветви ремонтов необходимо определить максимально возможное количество улучшений для данной ветви и необходимое количество первостепенного расходного материала для выполнения ремонтов. Для снижения себестоимости выпускаемого алюминия необходимо повсеместно использовать принцип модуляции силы тока в часы максимума нагрузки, что позволяет сократить потери оплаты мощности на 0,5 %. Наибольшую эффективность в экономии электроэнергии можно достичь за счёт предложенного метода, включающего сочетание модуляции силы тока и выполнения мелко-срочного и среднего ремонта в часы максимума нагрузки. В этом случае экономия электроэнергии увеличивается почти в два раза и достигает 1% от общей стоимости оплачиваемой электроэнергии. Выполнение ремонтных работ с использованием экспертного регулятора и системы КАНБАН в часы максимума нагрузки при совмещении модуляции силы тока позволит как минимум окупать затраты на проведение ремонтных работ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Тихонов В.А. К вопросу о методе диагностики преобразовательных трансформаторов предприятия по производству алюминия / В.А. Тихонов, И.В. Игнатъев // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – №4. – С. 98-104.

2. Тихонов В.А. Анализ дефектов в преобразовательных трансформаторах и пути снижения их аварийности / В.А. Тихонов // Энергетик. – 2019. – №2. – С. 11-15.

3. Тихонов В.А. К вопросу эксплуатации электрооборудования / В.А. Тихонов // Цветные металлы. – 2019. – №3. – С. 72-76. (Scopus)

4. Тихонов В.А. О влиянии периодичности диагностических измерений на повышение надёжности высоковольтных трансформаторов / В.А. Тихонов // Надёжность и безопасность энергетики. – 2019. – Том 12. – №1. – С. 18-21.

5. Тихонов В.А. Исследование трансформаторов 220 кВ с целью хроматографического анализа растворённых газов с помощью базы знаний экспертного регулятора / В.А. Тихонов // Современные наукоёмкие технологии. – 2018. – №5. – С. 163-167.

Статьи в журналах и материалы конференций:

6. Тихонов В.А. Роль современной диагностики электрооборудования в повышении надёжности электроснабжения алюминиевых заводов / В.А. Тихонов, В.А. Ероценков, В.А., М.И. Бастрыкин // Электрика. – 2006. – №5. – С. 26 – 28.

7. Тихонов В.А. Диагностика электрооборудования – как метод рационального использования финансовых ресурсов бизнеса в условиях мирового финансового кризиса XXI века / В.А. Тихонов, И.В. Игнатьев // материалы XI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. 20-24 апреля 2009 г.: Кн. 1. // Владивосток.: Изд-во ВГУЭС. – 2009. – С. 288.
8. Тихонов В.А. Метод диагностики высоковольтного электрооборудования / В.А. Тихонов, И.В. Игнатьев // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы VIII (XXX) Всероссийской научно-технической конференции. // Братск: ГОУ ВПО «БрГУ». – 2009. – С.253.
9. Тихонов В.А. Диагностика высоковольтного электрооборудования в рабочем режиме / В.А. Тихонов, И.В. Игнатьев // Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: в 2 т. // Братск: БрГУ. – 2010. – Т. 1. – С. 202.
10. Тихонов В.А. Надёжность и устойчивость автоматизированных систем управления / В.А. Тихонов // Фундаментальные исследования и Современные наукоёмкие технологии: Международная научная конференция // Современные наукоёмкие технологии. – 2010. – №4. – С. 61.
11. Тихонов В.А. Система государственного управления инновационными технологиями в образовании / В.А. Тихонов // Фундаментальные исследования и Современные наукоёмкие технологии: Международная научная конференция // Современные наукоёмкие технологии. – 2010. – №8. – С. 60 – 62.
12. Тихонов В.А. Планирование эксперимента при диагностике электрооборудования / В.А. Тихонов // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы X(XXXII) Всероссийской научно-технической конференции // Братск: ГОУ ВПО «БрГУ». – 2011. – С. 151.
13. Тихонов В.А. Метод оценки параметров системы для формирования базы знаний экспертного регулятора / В.А. Тихонов, И.В. Игнатьев // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы XI (XXXIII) Всероссийской научно-технической конференции // Братск: ФГБОУ ВПО «БрГУ». – 2012. – С. 185.
14. Тихонов В.А. Метод ошибки предсказания для оценки параметров экспертного регулятора / В.А. Тихонов // Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники: Международная научная конференция // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – №5. – С. 101.
15. Тихонов В.А. Метод оценки параметров системы для формирования базы знаний экспертного регулятора / В.А. Тихонов // Приоритетные направления развития науки, технологий и техники: Международная научная конференция // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – №5. – С. 103-104.
16. Тихонов В.А. Метод наименьших квадратов для оценки параметров экспертного регулятора / В.А. Тихонов // Актуальные вопросы науки и образования: Международная научная конференция // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – №6. – С. 111.

17. Тихонов В.А. Метод исследования состояния трансформатора, используя базу знаний экспертного регулятора / В.А. Тихонов // Наука и образование в современной России: Международная научная конференция // Международный журнал экспериментального образования. – 2017. – №8(Приложение). – С. 47.

18. Тихонов В.А. Метод увеличения скорости архивирования экспертного регулятора на основе графа знаний с нечётными вершинами / В.А. Тихонов // Наука и образование в современной России: Международная научная конференция // Международный журнал экспериментального образования. – 2017. – №9. – С. 48.