

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Братский государственный университет»

На правах рукописи



Тихонов Валерий Алексеевич

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

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
канд.техн.наук, доцент И.В. Игнатьев

Братск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Анализ отказов выключателей и трансформаторов	10
1.2 Существующие системы управления и диагностики электрооборудованием	12
1.2.1 Системы управления электрооборудованием УСПД RTU-325	16
1.2.2 MES – системы в управлении электрооборудования	19
1.2.3 SCADA – система управления электрооборудованием	25
1.2.4 Экспертные системы и регуляторы	29
1.3 Анализ эффективности систем управления и диагностики	36
1.4 Выводы по первой главе	38
2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАТОРОВ В СХЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 10-220 кВ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМА САМООБУЧЕНИЯ	39
2.1 Логический смысл экспертной системы	39
2.2 Создание статистической базы и механизм самообучения системы	42
2.3 Выводы по второй главе	54
3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЭКСПЕРТНОГО РЕГУЛЯТОРА, ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА 10 кВ	56
3.1 Принципы формирования правил чёткого вывода для экспертного регулятора по результатам диагностики развивающихся дефектов в преобразовательном трансформаторе	56
3.1.1 Граничные концентрации растворённых газов в масле	57
3.1.2 Структурная схема для анализа концентраций водорода – H ₂	59
3.1.3 Структурная схема для анализа концентраций диоксида углерода – CO ₂	61
3.1.4 Структурная схема для анализа концентраций ацетилена – C ₂ H ₂	63
3.1.5 Структурная схема для анализа концентраций метана – CH ₄	65
3.1.6 Структурная схема для анализа концентраций этилена – C ₂ H ₄	67
3.1.7 Структурная схема для анализа концентраций оксида углерода – CO	69
3.1.8 Структурная схема для анализа концентраций этана – C ₂ H ₆	72
3.2 Принципы формирования правил нечёткого вывода для экспертного регулятора по результатам диагностики развивающихся дефектов в преобразовательном трансформаторе	74
3.2.1 Структурная схема для анализа концентраций водорода (H ₂) и ацетилена (C ₂ H ₂)	74

3.2.2 Структурная схема для анализа концентраций метана (CH ₄) и диоксида углерода (CO ₂)	76
3.3 Выводы по третьей главе	84
4. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ РЕМОНТОВ «КАНБАН» К УСЛОВИЯМ РЕМОНТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	85
4.1 Выводы по четвёртой главе	96
5. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСОВ МАКСИМУМА НАГРУЗКИ ДЛЯ РЕМОНТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАТОРОВ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	97
5.1 Структура затрат по предприятиям алюминиевой промышленности	97
5.2 Анализ методов снижения электроэнергии на тонну выпускаемой продукции	98
5.3 Оценка эффективности внедрения модуляции	99
5.4 Факторный анализ ремонтных работ электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности	103
5.5 Выводы по пятой главе	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	107
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	116
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	117
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ДИПЛОМ УЧАСТНИКА МЕЖДУНАРОДНОЙ КНИЖНОЙ ВЫСТАВКИ	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Надёжность и безаварийность систем электроснабжения 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. На современном этапе развития систем электроснабжения широко используются вакуумные и элегазовые выключатели, распределительные устройства в элегазовой изоляции, кабели из сшитого полиэтилена, микропроцессорные устройства. Однако около 73% электрооборудования и трансформаторов в существующих системах электроснабжения напряжением 10 – 220 кВ предприятий алюминиевой промышленности было выпущено в 60 – 90 годах прошлого столетия, что оказывает существенное влияние на рост аварийности электрооборудования и сетей напряжением 10 – 220 кВ. 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. Решением

Целью работы является 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 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 работы заключается в следующем:

1. Разработан комплексный метод для сбора и анализа информации о текущем состоянии электрооборудования и трансформаторов для обоснования рации-

ональных 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 операций при выполнении ремонтов.

4. Определены рациональные периоды ремонта электрооборудования и трансформаторов с учётом часов максимума энергосистемы, что позволяет экономить 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 чёрной 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 ВО 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 «РУС-Инжиниринг» предприятий: ПАО «РУСАЛ-Братск», ПАО «РУСАЛ-Братск» филиал в городе Шелехов», АО «РУСАЛ Саяногорск».

На защиту выносятся:

1. Закономерность нечётности количества 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 учёных «Интеллектуальный потенциал вузов – на развитие дальневосточного региона России и стран АТР» (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) Всероссийская 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, в том числе 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, одного приложения. Основной текст диссертационной работы изложен на 120 страницах, содержит 27 рисунков и 8 таблиц.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведён анализ различных систем управления и диагностики электрооборудования. Рассмотрены примеры 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.

1.1 Анализ отказов выключателей и трансформаторов

Проведён анализ отказов в работе высоковольтного электрооборудования ПАО «РУСАЛ Братск» с учётом проводимой диагностики [1]. Сводный отчёт представлен в Приложении 1. На основании его, рисунок 1, сделан вывод, что при увеличении числа измерений диагностики улучшается представление данных о состоянии электрооборудования [2].

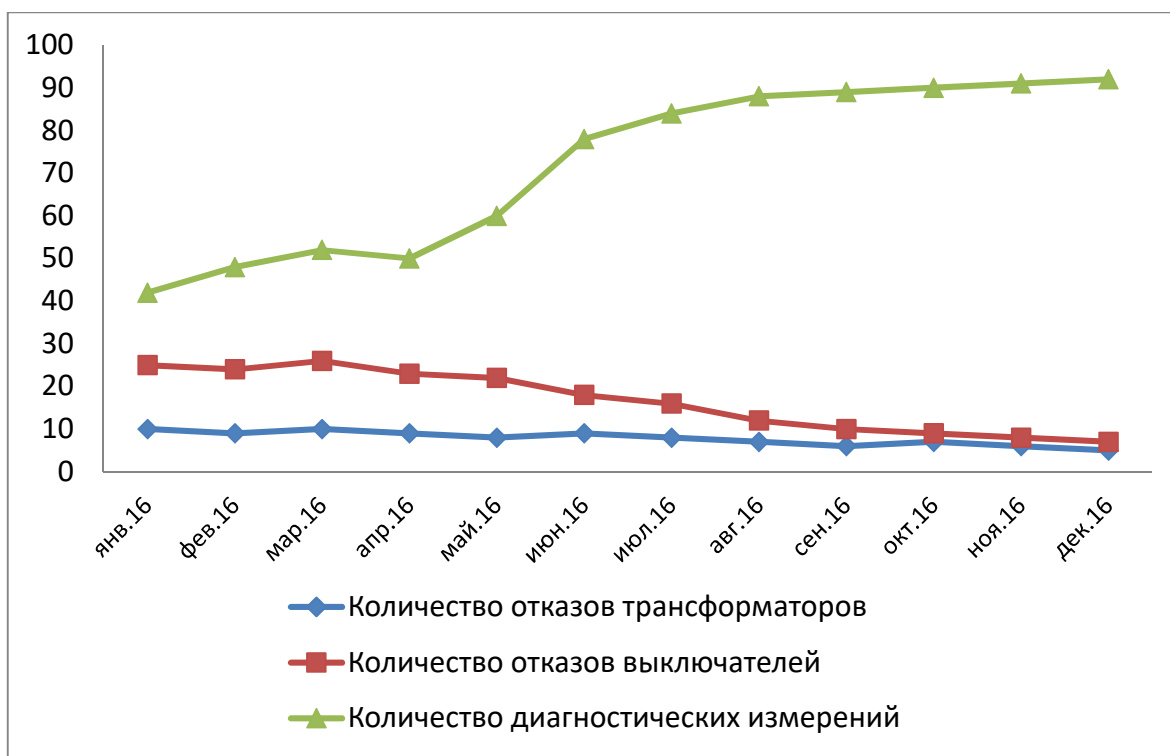


Рисунок 1 – Помесячное распределение отказов трансформаторов и выключателей в зависимости от количества диагностических измерений

Тем самым прогнозируется дальнейшая его эксплуатация, увеличивается плановый вывод неисправного электрооборудования в ремонт и снижается число отказов.

Системы диагностики являются составной частью систем управления электрооборудованием. Качественный анализ этих систем позволяет определить направление по усовершенствованию систем сбора и анализа эксплуатационных параметров электрооборудования и трансформаторов в системах электроснабжения напряжением 10-220 кВ алюминиевой промышленности [3]. Данная цель может быть достигнута при использовании качественных методов, определяющих текущее состояние электрооборудования и трансформаторов и совершенствование организации проведения ремонтных работ. Ниже приведён анализ количества малых, средних и капитальных ремонтов (рисунок 2).

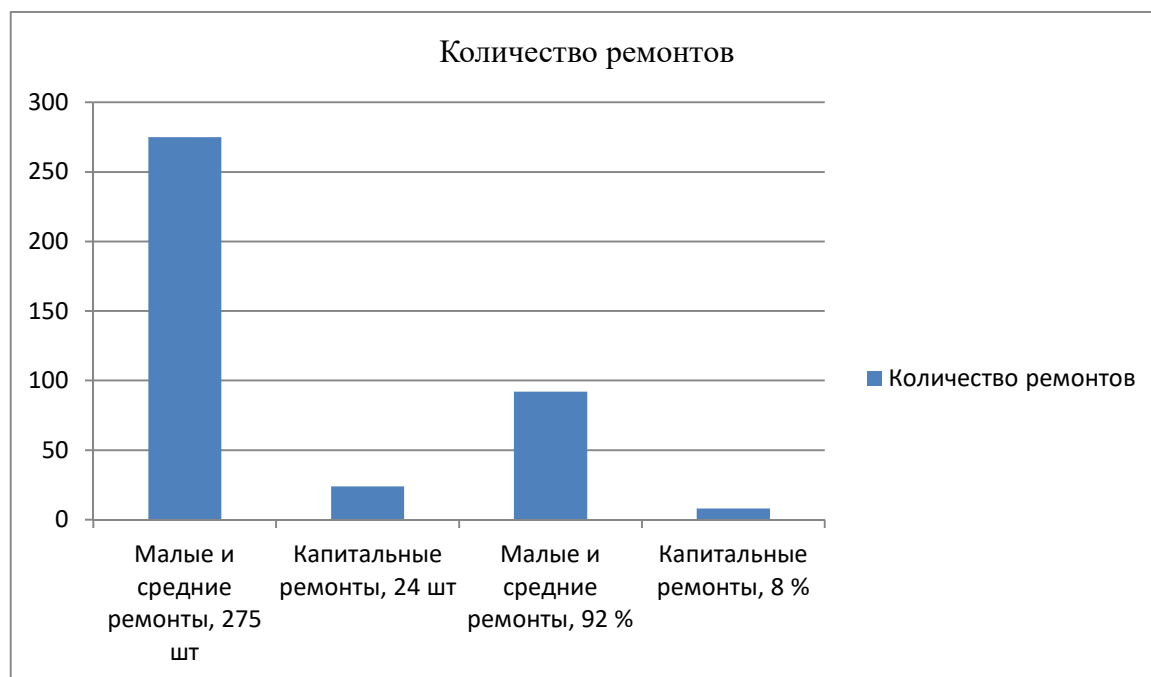


Рисунок 2 – Анализ малых, средних и капитальных ремонтов в течение календарного года

На основании проведённого анализа, представленного на рисунке 2, можно сделать вывод, что малые и средние ремонты составляют 92% от всех ремонтов [4], что является существенным при выборе методов эксплуатации электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности.

1.2 Существующие системы управления техническим состоянием и диагностикой электрооборудования

В настоящее время в нашей стране и за рубежом получили распространение следующие системы управления, включающие диагностику электрических объектов: УСПД, MES, SCADA и Экспертные системы с экспертными регуляторами. Система управления – комплекс устройств и объектов, направленных на помощь человеку в контроле и управлении объектами. Со времени изобретения реле, стало очевидным, что управлять объектом можно на расстоянии. С развитием научно-технического прогресса появились пускатели, полупроводники, компараторы, процессоры, контроллеры, компьютеры. И стало уже привычным управлять объектами и процессами на расстоянии и в комфортных условиях, но появилось множество проблем в таком управлении. Во-первых, системы сильно повлияли на сокращение операторского состава. В целом значительно увеличилось число контролируемых объектов на одного оператора. Время на принятие решений снизилось более чем в два раза. Во-вторых, системы оказались инвариантными [5]. Они не позволяют дополнить информацию или функцию управления. В-третьих, операционные системы АСУ оказались сильно зависимыми от поддержки той или иной ОС MICROSOFT. Запасные части систем оказались зависимыми от операционной системы, и порой приобрести видеокарту WINDOWS 2000 не представляется возможным по причине прекращения её выпуска. При этом переустановить ОС, не вызывая представителей завода - изготовителя АСУ или изменения проекта, невозможно.

В настоящее время для успешной работы ремонтных электросетевых предприятий, необходимо искать новые эффективные методы управления производством. Особенно в условиях реформирования электроэнергетики повсеместно внедрять производство профилактических ремонтов не по графикам ППР, а по наработке электрооборудования. На предприятиях металлургической отрасли: на приводах станочного парка, на электромостовых кранах, на литейных комплексах отслеживать наработку электрооборудования путём установки счётчиков моточасов. Проведённые исследования показывают, что до 45 % издержек в генерирую-

щем производстве и до 27 % в распределительном возникают при проведении ремонтных работ. Снизить эти издержки можно путём внедрения превентивных ремонтов, когда ремонт производится в зависимости от состояния электрооборудования [6]. Но так как электросетевые организации нацелены на недопущение аварий, проведение ремонтов лишь по факту произошедшей аварии недопустимо. Поэтому знание фактического эксплуатационного состояния энергетических объектов, является определяющим фактором при планировании и проведении профилактических ремонтов[7].

Определением эксплуатационного состояния на энергетических объектах, занимаются экспертные организации. Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей определяются критерии определения эксплуатационного состояния. Вместе с экспертными организациями на предприятиях, имеющих в своём штате электротехнические лаборатории и аккредитованный парк приборов с методическими инструкциями, соответственно они самостоятельно проводят данные экспертные оценки эксплуатационного состояния электрооборудования. Одной из первых и самых распространённых оценочных экспертиз является визуальная инспекция технического состояния объектов. Если при проведении экспертиз используются относительные единицы, то критерии оценок могут записываться в относительных единицах. После оценки электрооборудования ему присваиваются интегральные показатели, характеризующие его состояние[8]. Диагностические показатели, измеренные при работе электрооборудования, наиболее качественно помогают оценить работоспособность и эксплуатационное состояние электрооборудования. Срок службы электрооборудования, данные его высоковольтных испытаний, затраты на его ремонт вместе с диагностическими показателями имеют важное оценочное значение.

Одним из наиболее обсуждаемых в настоящее время критериев оценки работы электрооборудования является коэффициент технической готовности электрооборудования к работе. Рассчитывается коэффициент технической готовности из отношения разности времени непрерывной работы от времени вынужденных простоев к времени непрерывной работы. Характерным значением коэффициента

технической готовности электрооборудования являются его числовые значения близкие к единице. Измеренные и рассчитанные коэффициенты технической готовности электрооборудования электрических сетей как генерирующих, так и распределительных измеряются в пределах 0,9995-0,9998 относительных единиц. Данный показатель характеризует высокие коэффициенты технической готовности электрооборудования [9].

Для расчёта надёжности электрической сети применяется программа NEPLAN. Расчёт в этой программе производится в зависимости от переработанного количества электроэнергии и от коэффициентов технической готовности электрооборудования, измеренных по каждому отдельному элементу генерирующей и распределительной сети. При таком детальном расчёте можно выдать экспертную оценку каждому отдельному элементу электрооборудования распределительной и генерирующей сети. При детальном анализе оценочные характеристики отдельных объектов представляются исходя из их уровня надёжности электроснабжения и даются рекомендации к повышению коэффициентов технической готовности электрооборудования [10]. Коэффициент технической готовности учитывает характеристики сети – напряжение и силу тока.

Компания ABB разработав для анализа генерирующих и распределительных сетей метод CALPOS-Main, стремилась повысить коэффициент технической готовности электрооборудования выстраивая систему планирования ремонтно-профилактических работ. Разработанные компанией ABB методы планирования сводились к унификации систем управления ремонтными подразделениями. Ремонтные подразделения представлялись как предприятия работающие на принципах аутсорсинга в структурах генерирующих и распределительных электросетевых компаниях [11]. Результатом метода являлось представление макета финансового плана в бюджете операционных затрат предприятий, структурированных по ремонтам, инвестициям, распределению ремонтов на : оперативный ремонт, техническое обслуживание и текущий ремонт. Отдельной статьёй затрат представлялись бюджетные пакеты планов капитального ремонта, в том числе продлевающего срок полезного использования основных силовых и преобразовательных

трансформаторов, генераторов, высоковольтных выключателей, систем возбуждения генераторов и синхронным электродвигателей. Итоговым блоком пакета финансового плана выводились приоритеты реализации предложенного бюджетного пакета [12].

После выводов метода строится диаграмма паретто, на которой каждому элементу электрической сети присваивается показатель надёжности и рассчитывается коэффициент технической готовности. Исходя из этого, определяется вид превентивного обслуживания, профилактического ремонта, оперативного ремонта, капитального ремонта или замены электрооборудования. Систематизируются данные о диагностике электрооборудования [13], определяется индивидуальный план технического диагностирования.

Для оперативного сбора диагностической информации и визуального контроля применяются специально разработанные для оперативного персонала наладочные компьютеры (PDA), в них заносится вся диагностическая информация и посредством локальной беспроводной сети передаётся на сервер базы данных контроля эксплуатационного состояния электрооборудования. Объединённая с CALPOS-Main система носит название ePAT. Сервер базы данных устанавливается в непосредственной близости к центру электрических нагрузок и передаёт данные по локальной информационной сети в центральный сервер операторского пульта центрального щита управления электросетевым хозяйством предприятий. Все связанные между собой средства контроля и методы формирования и передачи данных образуют единую информационную сеть. Для формирования бюджетных пакетов используются программы SAP R/3 [14]. Устройства сбора и передачи данных (УСПД) являются важнейшим компонентом систем коммерческого учета электроэнергии АИИС КУЭ (АСКУЭ). Представляя собой последнее пломбируемое устройство в структурной логической схеме передачи данных "счетчики" - "УСПД" - "система верхнего уровня", УСПД осуществляет сбор данных со счетчиков (датчиков), их обработку и хранение, передачу накопленных данных в различные системы верхнего уровня. К УСПД предъявляются высокие требования по функциональности, конструкции и надёжности [15].

В то же время необходимо учитывать, что на современных предприятиях к УСПД в технических системах учета электроэнергии предъявляются дополнительные требования по организации локальных рабочих мест производственного персонала и сопряжению с существующими системами управления производством (АСУП), системами оперативного управления производством (MES-системы), технологическими АСУ ТП и SCADA-системами.

1.2.1 Системы управления электрооборудованием УСПД RTU-325

Для комплексного решения задач коммерческого и технического учета компания Эльстер Метроника представляет модельный ряд УСПД RTU-325: RTU-325, RTU-325L, RTU-325H. Все перечисленные модели УСПД имеют одинаковые совместимые функциональные возможности, но разное конструктивное исполнение и характеристики для удовлетворения разноплановых требований к построению систем.

В счётчиках УСП RTU-325 реализуется функция контроля режимов работы электросетей. Датчики, установленные для контроля параметров напряжения, силы тока подключаются к функциональным блокам счётчиков и учитывают до восьми контролируемых и измеряемых данных: дату контроля, время контроля, силу тока, напряжение, активную мощность, реактивную мощность, полную мощность, расход электроэнергии. Мгновенные значения записываются в память счётчиков с определённой частотой опроса. Частота опроса выбирается исходя из условий, требуемых для анализа работы электросети и её конфигурации. Поэтому частоту опросу можно изменить и задать автоматическое изменение частоты опроса в зависимости от времени суток и требуемых режимов работы.

Полученные данные хранятся в отдельном сервере системы и необходимы для укрупнённого анализа быстроразвивающихся процессов работы контролируемой электросети. Графики суточных значений мощности необходимы для анализа потребляемой мощности, по которой, в конечном счёте, производится оплата за потреблённую электрическую энергию. Счётчики, установленные в контролируемую

емых точках электрической сети, позволяют записывать на сервер не только мгновенные значения, но и суточные данные. Таким образом, представляются данные для статистической обработки мгновенных изменений работы электросети и результаты работы за сутки. Кроме этого малая дискретизация представления контролируемых данных круглосуточно записывается на сервер системы. В сформированных базах данных данные могут храниться достаточно долго, но изменения контролируемых величин не соотносятся к требуемым параметрам. То есть в выходных базах данных получают наборы контролируемых значений, которые обработать, возможно, только дополнительными методами статистической обработки данных. Кроме этого малая дискретизация не даёт видимого контроля динамических развитий аварийных ситуаций, для представления которых так же требуется применение методов статистической обработки данных.

Методами статистической обработки данных можно получить представление полной характеристики, как самого контролируемого объекта, так и изменения его эксплуатационного состояния. Дополнительное применение методов статистической обработки данных приводит к увеличению времени на обработку и к возможному не правильному выводу об эксплуатационном состоянии электросети, из-за не правильного выбранного метода обработки. Поэтому для динамично изменяющегося характера нагрузок, в частности таких как алюминиевая промышленность данный метод не даёт полного отчёта о эксплуатационном состоянии электросети.

Для целей коммерческого учёта электрической энергии данный метод подходит как нельзя лучше. Связано это прежде всего с тем, что малая дискретизация параметров позволяет сделать оценочное прогнозирование электропотребления в будущих периодах, что очень важно при работе с операторам рынка электроэнергии и мощности. Для выдачи долгосрочного прогноза о потребляемой мощности использование малой дискретизации контролируемых параметров позволяет качественно реализовать данную функцию [16].

Дополнительным блоком в системе выделен блок электрических схем. Специальный редактор, содержащий в своей платформе электрические схемы релей-

ной защиты и автоматики, сертифицированные согласно, стандарта МЭК 61131. Данный функциональный блок позволяет при конфигурации архитектуры сети, быстро и качественно создавать новую структуру сети, либо добавлять обновлённые элементы в действующую схему. Помимо основных элементов сети функциональный блок позволяет выводить на мнемосхему, сигналы от систем автоматической сигнализации и телеуправления. Предупредительные сигналы выводятся на экраны операторов, контролирующих мнемосхему, в виде жёлтых сообщений. Аварийные сигналы выводятся на мнемосхему в виде красных сообщений. Все поступающие сигналы как предупредительные, так и аварийные, записываются в базу данных системы. При воздействии оперативного персонала на органы управления коммутационными аппаратами, проходящие предупредительные сигналы, так же записываются в базу данных сервера. Кроме того сигналы от органов управления коммутационными аппаратами выводятся на экраны мониторов операторов и так же записываются в систему. Недостатком данного модуля можно признать невозможность проконтролировать алгоритм правильной последовательности действий при записанном порядке переключений в базу данных сервера. То есть последовательность переключений выводится на экран, а правильность их очередности не анализируется [17]. Данный алгоритм дорабатывается в системе посредством подключения статистического модуля, который посредством записанных в него порядков переключений, может определить правильность их очередности и при нарушении порядка переключений способен выдать предупредительный сигнал об ошибочных переключениях. При подключении оценочного модуля увеличивается время на обработку информации и требуется проведение сравнительного анализа для оценки правильности выполнения переключений. В целом система может качественно работать на небольших участках электросети, где не требуется оценка динамически развивающихся дефектов в электрооборудовании и не выполняется большое количество переключений в электроустановках.

Все параметры электрической сети выводятся на экраны пользователей и представляются в виде табличных баз данных, содержащих в себе текущее состо-

яние электрической сети. На рабочие компьютеры пользователей выводятся данные о фактическом расходе электроэнергии и на вновь созданных присоединениях отображаются данные о характере электрической нагрузки. Обладающие большой функциональностью интерфейсы системы, позволяют выполнить задачи любой сложности, кроме динамической оценки эксплуатационного состояния электрооборудования. Вся элементная база выполняется в защищённом корпусе со степенью защиты IP 61 и способна работать в условиях повышенной запылённости и повышенной влажности. Улучшенными свойствами обладают RTU-320, которые имеют встроенную оперативную память. Оперативная память этих устройств способна хранить до 1000 записей и воспроизводить последние 20 системно-проработанных решений по архитектуре сети [18]. Объединённая с функциональными блоками система УСПД на производстве может успешно работать в несложных электрических сетях и выступать как основной её элемент.

1.2.2 MES – системы в управлении электрооборудования

MES (Manufacturing Execution System) – оригинальная промышленная система, разработанная для промышленных предприятий различных отраслей. Осуществляет сопровождение всей технической документации. Начинает свою работу от разработки технических заданий, паспортов на электрооборудование, до выполнения функции формирования протоколов испытаний на электрооборудование. Протоколы испытаний заносятся в систему в виде отдельных документов, при этом данные из протоколов сохраняются и переносятся в таблицы ввода данных. По табличным значениям формируются соотношения параметров контролируемых объектов и строятся графики данных в динамике [19]. При выполнении ремонтных работ происходит формирование актов выполненных работ, которые составляют структуру затрат предприятия. Таким образом, система не только формирует параметры работы электрооборудования, его важные составные части, проводит анализ динамики изменения контролируемых данных, но и формирует затраты предприятия. Исключением составляют затраты, производимые при воз-

никновении нестандартных или внеплановых ситуаций. При возникновении внеплановых остановок электрооборудования, при аварийных ситуациях, система не может сформировать затраты на произведённый ремонт и выполнить анализ изменения структуры затрат. Поэтому система формирует затраты предприятия на плановые ремонтные работы и контролирует параметры электрооборудования в нормальных режимах. Параметры нормального режима полностью соответствуют произведённым затратам. Недостатком системы является невозможность проведения анализа и контроля затрат при возникновении аварийной ситуации и закрепления затрат по изменяющимся в динамике контролируемым параметрам электрооборудования, но так как данный раздел не является лимитирующим в большинстве отраслей промышленности, то разработчиками системы этот вопрос не прорабатывался.

Система MES включает в себя несколько функциональных блоков. Каждый блок разработан под определённый функциональный параметр. Работа всех функциональных блоков основана на статистическом анализе данных, которые хранятся в серверах верхнего уровня головной систем.

Функциональный блок анализа состояния и распределения затрат необходим для управления технологическими ресурсами, для контроля затрат на обучение персонала, для контроля за неснижаемым номенклатурным запасом товарно-материальных ценностей. Выстраивает цепочку вовлечения товарно-материальных ценностей по принципам потребностей в основном производстве, при этом учитывает минимальную границу хранящихся на складе материальных ресурсов. Контролирует наличие документов, необходимых для технологического процесса производства, для начала производства определённых видов выпускаемой продукции, а так же для переналадки и перенастройки производственных мощностей.

Оперативный блок управления процессом производства, предназначен для координации всех ресурсов внутри производств по сферам деятельности и включает в себя: характеристики основных элементов производств, производит упорядочивание следующих друг за другом процессов, учитывает загруженность мощ-

ностей и производств на единицу выпускаемой продукции. Основной задачей данного функционального блока является выстраивание производственного задания с минимальными отклонениями от суммарного времени на перенастройку основных производств и служит для сокращения времени на получение готовой продукции. Основным недостатком блока является отсутствие механизма реализации параллельности процессов и отсутствие контроля, за изменением параметров электрооборудования.

Блок диспетчеризации производства, управляет всем спектром выпускаемой продукции предприятия. Структура предоставления информации позволяет увидеть весь процесс производства в реальном времени, со всеми начальными изменениями, что позволяет производить изменения календарного плана и снижать выход некачественной продукции. Он включает функцию контроля отнесённых трудозатрат во всех точках процесса и архивирует данные. Вместе с блоком – управление документами, формирует и утверждает документы и рабочие чертежи. Особенно важным свойством, является формирование движения документов при изменениях, при отгрузке готовой продукции, а так же при формировании отчётных документов [21].

Блок сбора и хранения данных предназначен для связи с информационными системами, функционирующими на всех уровнях предприятия. Он взаимодействует с технологическими системами, участвует в передаче технологических данных и позволяет накапливать их.

Блок управления персоналом, предназначен для контроля персонала. Он позволяет получать отчётность по использованию рабочего времени персонала, в том числе о производственной деятельности, влияющей на непосредственное получение качественных продуктов производства. Так же проводит оценку загрузки персонала и управляет им при требуемых условиях по времени выполнения контрактов. Вместе с блоком качества, он измеряет показатели, требующие непосредственного вмешательства в процесс производства для ремонтного персонала [22].

Блок управления процессом производства предназначен для принятия управленческих решений контролёрами системы, которые производят отслежи-

вание производственного процесса, наблюдая за мониторами системы управления. Данный блок способен выполнить формирование тревожных сигналов, которые применяются для сигнализации ненормального режима или отклонений в процессе [23]. Тревожные сигналы, сформированные блоком, передаются контролёрам режима и записываются в архив системы. Взаимодействие MES системы и интеллектуального верхнего уровня, данный блок производит благодаря архиву сбора и хранения базы данных [24].

Особую роль в системе имеет блок техобслуживания и ремонта. Помимо того, что он управляет процессом обслуживания и ремонта электрооборудования, он формирует графики, как планово-предупредительного ремонта, так и ремонта по техническому состоянию. В архив данного блока заносятся данные диагностических измерений, которые в дальнейшем используются системой для определения оптимального времени выполнения ремонтов. Все процессы ремонтов выполняются в строгой последовательности один за другим, при этом отслеживается время на выполнение отдельных операций. При проведении диагностических измерений данные протоколов заносятся в систему в ручном виде, и в дальнейшем появляется возможность вывести их на экран контролёра ремонта. Данная информация позволяет провести анализ работы оборудования и его производительности, а так же оценить эффективность выполнения конечных продуктов производства и производственного процесса в целом [25]. Все модули MES системы сертифицируются на международном уровне, с присвоением стандартов ISA 88, ISA 95, которые определяют технологию выполнения ремонтов, обслуживания и сохранности архивных данных наиболее важных показателей. В частности к высоковольтному оборудованию, данные показатели по перенапряжениям в электрических сетях [26]. Так же модули системы создают описание бизнес процесса предприятия и выявляют цепочки создания отдельных видов продукции на основе эффективных методов производства. Для оперативного решения задач с обслуживающим персоналом и выявления наиболее рациональных методов ремонта [27], блоки позволяют построить требуемый уровень диспетчеризации. В системе электропитания с радиальными схемами высоковольтных кабельных линий, большое

значение имеет ограничение токов однофазного замыкания на землю [28]. Полученные диагностические данные позволяют определить места установки ограничителей перенапряжения в таких системах и избежать крупных аварийных ситуаций на высоковольтном оборудовании.

Добиться выполнения заказов в сжатые сроки, сократить время выпуска продукции и более эффективно [29] использовать доступные производственные ресурсы, повысить основные показатели эффективности производства (ОЕЕ), сократить потери и брак при производстве, централизованно управлять выпуском продукции и быстро реагировать на происходящее в цехе позволит MEScontrol – мощный инструмент, который решает все перечисленные задачи.

MEScontrol – это не административная ERP-система, ориентированная на хозяйственные операции, а автоматизированная система управления производственными процессами. MEScontrol обеспечивает информационную связь между производством в цехе и административными системами, поддерживает передачу в реальном времени производственных параметров и инструкций машинам и персоналу. Мощные инструменты позволяют повысить эффективность производства [30], снизить стоимость и свести до минимума фактор человеческих ошибок. Наибольшие выгоды от использования MES системы достигаются в результате повышения прозрачности производства, что открывает возможности для непрерывного усовершенствования процессов и качества управления. Платформа MES обеспечивает доступ к точной, оперативной информации о работе производства.

Это позволяет производителям отыскивать и затем использовать новые внутренние ресурсы и внешние рыночные возможности. MEScontrol положительно влияет на все заинтересованные стороны. Персоналу требуются своевременные рабочие инструкции и информация [31]. Заказчики требуют гибкости, качества и приемлемых цен. Руководство пытается увеличить прибыль и обеспечить рост производства. Эти задачи должны решаться одновременно. MEScontrol хорошо масштабируется под конкретные потребности. Система базируется на индустриальных стандартах, таких как ISA-95, что позволяет использовать ее как на больших, так и на малых промышленных предприятиях, работать с дискретными,

непрерывными и батч-процессами. MEScontrol интегрируется с ERP-системами и управляет процессами в цехе в режиме реального времени. Система имеет модульную структуру, позволяет адаптировать функционал под конкретное предприятие.

MEScontrol разрабатывается в соответствии с индустриальным стандартом ISA-95, который определяет структуру и функционал MES систем [32]. Благодаря этому MEScontrol подходит как для больших, так и для малых предприятий, дискретных, непрерывных и батч-процессов. ISA-95 также определяет модель интеграции административных бизнес-систем с автоматизированными системами, работающими в цехе.

Язык B2MML (business-to-manufacturing markup language) определяет стандартные протоколы взаимодействия ERP и MES систем, которые охватывают структуру продукции, планирование, производственные ограничения и так далее. B2MML поддерживается всеми крупнейшими производителями ERP - систем, в том числе SAP, Baan, Oracle, JD Edwards и Microsoft.

Стандарт OPC (OLE for Process Control) унифицирует обмен данными в режиме реального времени между различными управляющими устройствами. MEScontrol взаимодействует с OPC-совместимым оборудованием и программным обеспечением напрямую, без необходимости в дополнительных драйверах и интерфейсах. OPC поддерживается большинством производителей индустриального оборудования и программного обеспечения. Протоколы OPC могут реализовываться для таких устройств, как лэйбл-принтеры, сканеры штрих-кодов, RFID и измерительные устройства, упаковочное оборудование, PLC-устройства, SCADA системы и прочее.

ClearSCADA – наиболее распространённое в настоящее время русифицированное приложение для управления производственными процессами. Поскольку ClearSCADA имеет практичное программное обеспечение и позволяет конфигурировать свою структуру на пользовательском уровне, то область применения её очень разнообразна. Она применяется в металлургии, в автомобильном хозяйстве, в управлении трудовыми ресурсами, на объектах жилищно-коммунального хозяй-

ства, в энергетике – как в высоковольтной, так и в низковольтной и благодаря использованию простой и удобной связи между клиентом и сервером, достигается оптимальная структура управления системой. Использование промышленных стандартов: OLE, OPC, HTTP/XML, ODBC, а так же открытых протоколов связи: DNP3, Modbus RTU/ASCII, IEC 60870-5-101 & 104, DF1, Siemens S7 позволяет полнофункционально предоставлять доступ к архивам данных, выводить сообщения о тревогах, выстроить сигнализацию и подключить средства автоматизации и связи, интегрировать в свою структуру готовые верхние уровни систем нефтегазовой промышленности, систем электроснабжения и водоснабжения [33]. Серверы системы позволяют одновременно пользоваться информационными ресурсами многочисленным клиентам и операторами, производить копирование базы данных и перенос её в требуемый функциональный блок. Система информационной безопасности, построенная на использовании пользователями прав и паролей, полностью обеспечивает защиту информации.

1.2.3 SCADA – система управления электрооборудованием

SCADA расшифровывается как *Система Контроля, Управления и Обработки полученных и накопленных данных*. В основном она применяется в производственных системах управления: компьютерная система мониторинга и управление процессом. Процесс может быть производственным, инфраструктура или средство, базируемое как описано ниже.

Производственные процессы относятся к производству [34], изготовлению продукции, выработке энергии, изготовлению и очистке и могут идти в непрерывном, блочном, повторяющемся или дискретном способе.

Инфраструктура процессов может быть общая или частная и включать водоочистку и распределение коллектора и очистку сточных вод, нефти и газопроводов, передачу и распределение электроэнергии и большие системы коммуникации.

Плавность процессов необходима в общественных услугах и в частных, включая здания, аэропорты, суда и космические станции. Они контролируют и управляют HVAC, доступом и потреблением энергии.

Система SCADA обычно состоит из множества подсистем. Человечески-машинный Интерфейс или HMI - аппарат, который обрабатывает мгновенные действия оператора, и через них оператор контролирует процесс и управляет им.

Контролирующая (компьютером) система собирает (приобретенные) данные процесса и посылает команды (управления) к процессу. Отдаленные Предельные Единицы (RTUs), соединяющиеся с датчиками в процессе, преобразовывают сигналы датчика в цифровые данные и посылают цифровые данные в контролируемую систему.

Программируемый Логический Диспетчер (PLCs), используемый как полевые устройства, потому что они более экономичны, универсальны, гибки и конфигурируемы, чем RTUs специального назначения.

Инфраструктура коммуникации, соединяющая контролируемую систему с Отдаленными Предельными Единицами есть в нескольких отраслях промышленности. Большие различия между системами SCADA и распределенными системами управления (DCS) связаны с их предназначением. Вообще говоря, система SCADA обычно относится к системе [35], которая координирует, но не управляет процессами в режиме реального времени. Рассмотрение по контролю в реальном времени затруднено несколько более новой телекоммуникационной технологией, позволяющей надежное, низкое время ожидания, коммуникации высокой скорости по широким областям. Большинство различий между SCADA и Распределенной системой управления DCS культурно определены и могут обычно игнорироваться. Поскольку инфраструктуры коммуникации с более высокой способностью становятся доступными, различие между SCADA и DCS исчезнет.

Человечески-машинный Интерфейс или HMI - аппарат, обрабатывающий данные оператору, через который оператор управляет процессом. HMI обычно связывается с базами данных системы SCADA и программами, позволяет обеспечить отклоняющиеся, диагностические данные, и информацию управления:

намечаемые процедуры обслуживания, логистическую информация,- детализировала для специфического датчика или машины и экспертной системы. Система НМІ обычно представляет информацию операционному персоналу графически, в форме диаграммы. Это означает, что оператор может видеть схематическое представление управляемого завода [36]. Например, картина насоса, связанного с трубой, может показать оператору, что насос работает и сколько жидкости качает через трубу в настоящее время. Оператор может тогда выключить насос. Программное обеспечение НМІ покажет расход жидкости в трубе в режиме реального времени. Диаграммы могут состоять из графических и схематических символов, чтобы представить элементы процесса, или из цифровых фотографий оборудования процесса, над которым лежат, с управляемыми символами.

К ним же относится система Smart Grid. В настоящее время данная технология очень широко используется во всех развитых странах, но наиболее полное распространение она получила в Европе и в основном связано это с высокой ценой на электроэнергию. Задачами системы является максимальное эффективное использование ресурсов для сокращения потерь электроэнергии и одновременно с этим решаются задачи оптимального использования природных ресурсов и улучшения экологических проблем. Критериями решения этой задачи послужило развитие интеллектуальных сетей, с помощью которых контролируются все параметры, влияющие на потери энергоресурсов, так называемых "умных" сетей [37], имеющих сегодня название Smart Grid. Стандарт Smart (Self Monitoring Analysis and Reporting Technology) – стандарт самодиагностики, анализа и отчета – был разработан для повышения надёжности и возможности контроля оборудования на расстоянии. Эффективность системы заключается в осуществлении контроля, в отслеживании энергетических параметров, влияющих на режим работы оборудования, в проведении сравнений требуемых величин с действующими значениями, и далее за счёт перераспределения мощности и загрузки её наиболее эффективным способом достигается режим наименьших потерь, что в конечном счёте приводит к экономии энергоресурсов [38].

При ежегодном потреблении электроэнергии [39] потери мощности от общего потребления, составляют: в Японии – 5 %, в Китае – 3 %, в России – 15 %, в Западной Европе – 4-9 %, в США – 7-9 %. Таким образом, использование "умных" сетей в Западной Европе, в Китае, в Японии и в США, позволило сократить общие потери мощности в 2 раза и оправдало их применение.

Система спроектирована на двухсторонней связи между поставщиком и потребителем электроэнергии. Эксперты операторов торговой сети прогнозируют увеличение потребления электроэнергии к 2030 году в два раза, и как следствие к увеличению выбросов миллиарда тонн углекислого газа. Использование стандарта "умных" сетей и повсеместное его внедрение во все сферы жизнедеятельности нашего общества, позволит снизить величину потерь электроэнергии и сократить её дополнительную выработку на 9%, тем самым снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Российский опыт внедрения "умных" сетей, называемых – активно-адаптивными сетями, показывает ограниченное внедрение её в двух субъектах: на Алтае, на подстанции Алюминиевая, установлены батареи конденсаторов [40], для компенсации реактивной мощности и на подстанции Выборгская в Ленинградской области установлены системы регулирования реактивной мощности, что позволит снизить потери мощности на передачу её в Финляндию.

Ведущим предприятием, внедряющим технологию активно-адаптивных сетей в России, является ОАО "Холдинг МРСК". В структуре холдинга работают предприятия распределительных сетей, проектные и научно-исследовательские институты. Сетевое хозяйство холдинга достаточно обширно и включает в себя более 2 млн. км линий электропередачи. Применение активно-адаптивных сетей связано так же и с применением альтернативных источников выработки электроэнергии: геотермальные станции, солнечные батареи и ветряные установки [41]. Выработка электроэнергии из этих источников плохо поддаётся контролю, из-за непостоянного влияния источников альтернативной энергии, поэтому без применения активно-адаптивных сетей, учитывающих эффективное распределение мощности среди генерирующих и потребительских распределительных сетей не

обойтись. Суммарная выработка альтернативной энергии в России составляет 1 %, в Европе более 5 %, в Китае более 10 %. Развитие альтернативной энергетики и внедрение активно-адаптивных сетей позволит значительно улучшить эти показатели и привести выработку альтернативной энергии к 20 % [42]. Ограничивающими факторами внедрения таких сетей являются: дороговизна применяемых стандартов, высокий срок окупаемости вложений, отсутствие мотивированной части у крупных генерирующих компаний, поскольку основная прибыль идёт от продажи энергии, а не от её экономии. Особенности внедрения данного стандарта сетей является регулирование электрических режимов установленного оборудования. В России 60% электрооборудования выработало свой срок эксплуатации, а 10 % отработал два срока службы. В США 40 % электрооборудования отработало более 25 лет. Применение нового стандарта сетей требует замены установленного оборудования и только после этого его использование для регулирования режимов распределения мощности и снижения её потерь соответственно.

1.2.4 Экспертные системы и регуляторы

Особенностями схемы электроснабжения предприятий алюминиевой промышленности является их структура, спроектированная по первой категории в отношении надёжности электроснабжения и, как было сказано выше, высокий срок службы высоковольтного электрооборудования. Перерыв в электроснабжении алюминиевых заводов недопустим, поэтому вопросы надёжного и бесперебойного обслуживания электрооборудования всегда являются приоритетной задачей. Для выполнения ремонтных работ на высоковольтном оборудовании, необходимо оценить устойчивость оставшегося в работе подстанционного оборудования. Проверить множество факторов, влияющих на устойчивость режима и выявить значимые параметры, необходимые для принятия решений о выводе в ремонт. Поэтому при большом количестве факторов и определяющих параметров основным критерием будет оценка, выполненная экспертом, имеющим опыт работы и эксплуатации данного оборудования.

Экспертные правила и оценки, создаются на основе анализа факторов и параметров работы оборудования. Для помощи экспертам, создаются программы позволяющие выполнить сохранение параметров эксплуатируемого оборудования и по запросу эксперта выдать данные, которые эксперт сможет обработать и оформить результат. Параметры об оборудовании и принятые на их основе выводы и результаты очень многообразны. Правильная интерпретация данных позволяет дать заключение о работоспособности оборудования или о его ремонте, наоборот, при неправильной оценке результатов, может произойти аварийное отключение оборудования. Результаты и выводы экспертов можно записать в виде правил. Правила в экспертных системах имеют качественную оценку и поэтому записываются в виде продукционных правил. Правила записываются экспертами и в большинстве экспертных систем имеют конечную цель, которая определяет во-первых условия дальнейшей эксплуатации оборудования, а во-вторых может спрогнозировать время или период вывода в ремонт оборудования. В системах OPS-5, EMYCIN, AGE, продукционные правила, стали языком представления знаний, и теперь с его помощью, эксперт может общаться с интерфейсом экспертной системы. Экспертная система, сформированная системой продукционных правил, то есть языком самой программы, способна сравнивать архивные данные с продукционными правилами и с полученными фактическими значениями и выводить результат своей работы без помощи эксперта. Правила локальных знаний так же представляются на языке знаний, но не продукционных, а в виде фреймовых правил.

Если человек рассматривает правила, как некий алгоритм в решении своей задачи, то экспертные знания, записанные в виде продукционных правил или фреймов, позволяют сформировать экспертную систему, которая способна решить поставленную задачу в области эксплуатации электрооборудования предприятий алюминиевой промышленности и придать ей ясный смысл. При этом сопутствующие параметры и технологические отклонения без труда добавляются в систему и формируются в ней новые знания. Компьютерная обработка позволяет быстро и с однородностью, представленных по одному типу знаний, определить механизм их использо-

вания просто и с высокой точностью. Эти главные отличительные способности экспертной системы стали причинами широкого распространения продукционного метода представления знаний.

Правила и наборы правил, составляют базу правил или базу знаний продукционной системы, так же как и оперативная или рабочая память системы с предпосылками, характеризующими конкретную область знаний или решения задач в конкретной сфере предприятий алюминиевой промышленности. Логический механизм способный решать задачи и проводить анализ правил, загруженных в базу знаний, составляют основу продукционной системы.

Хорошим примером представления знаний при помощи предикатов являются мощные программы логических построений и утверждений. Созданные на базе математической логики программы, позволяют получить новые знания из ранее известных правил и таким образом обучить систему новым правилам. Сформированные с помощью предикатов знания и служат механизмом самообучения системы. Предикаты отражают цепочки построения новых знаний, но и вместе с ними, логика высказываний может так же служить примером самообучения системы. Высказывания или предложения, имеющие два значения ложь или истина, могут существовать отдельно, либо решение одного предложения может служить решением другого, например, с помощью высказывания 1 можно получить высказывание 2 и наоборот. В реальной среде семантика высказываний не учитывается, из-за того, что простые высказывания разделяются ни их истинность или ложь, и не рассматриваются как любые переменные высказывания.

Семантические сети для представления знаний использовались давно, но их систематическое изучение наиболее полно, начало развиваться Квиллианом. Он предположил, что каждый человек независимо от языка, сам для себя вырабатывает правила, которые потом использует в повседневной жизни. Высказывания людей такие разные, что присваивать им определённые значения было бы просто не разумно. Вместе с тем, все высказывания основываются на одном утверждении - истина или

ложь. Поэтому Квиллиан предложил все семантические сети разделить на два этих типа. Большую часть своих работ он посвятил извлечению из памяти человека знаний и их сохранению в различных информационных системах, при этом обеспечить работоспособность системы при множестве различных высказываний. Знания, таким образом, должны иметь свою структуру организации, чтобы убрать сомнения в их правильности. Научное сообщество с большим интересом относилось к работам Квиллиана и ожидало их применения не только в промышленности, но и в психологии, но к большому сожалению эти знания не получили широкого распространения в психологии и исследованиях памяти человека. Многие учёные, пытались проверить адекватность решения этой задачи, и Коллинсу это удалось сделать. Коллинс вместе с Квиллианом решали множество задач на испытуемых, которым задавали вопросы о принадлежности разных понятий к своей категории со своими свойствами, при этом они измеряли время на решение поставленных задач. Чем больше становилось задач, тем стремительно увеличивалось время на поиск нужной категории, таким образом при увеличении узлов в сети, время на поиск правильного ответа увеличивалось. То же самое происходило и с определением неправильного ответа, только время здесь увеличивалось на порядок больше. Многие учёные стремились решить эти вопросы, и попытку применения ассоциативных сетей сделал Вудс. Логическая и эвристическая неадекватность сетей является их недостатком. В 1970-м году Вудс разработал метод и применил логическую неадекватность для реализации задачи извлечения информации из памяти человека. Сами по себе логически неадекватные сети являются неформализованной структурой, но это и даёт им преимущество применения в качестве самоорганизующихся систем. Вудс был увлечён термодинамикой и прекрасно понимал, что возрастание энтропии в решении многообразных задач, обязательно приведёт к правильному выводу и чем она выше, тем качественнее становилось решение. Поэтому логически неадекватные сети как нельзя лучше подходили для разработанной им экспертной системы. Смещение семантических связей с продукционными правилами обосновывало определение того, что они сами и являются средством извлечения информации и конструированием правил на основе знаний, при этом набор ассоциативных механизмов оставался неизменным.

Знания, заложенные в правила, сами по себе не управляют механизмом поиска информации, поэтому сети называются эвристически неадекватными. Механизм поиска информации не предполагает наличие какого-то знания о том, как его реализовать [44], поэтому эти два исключения зачастую только негативно усиливают сами себя. Допустим отрицание и исключение невозможно представить в данной ситуации, тогда возникшая логическая неадекватность приведёт к "провалам" знаний, который так же нельзя исключить эвристически, закончив поиск, получая эвристическую неадекватность.

Решения данной задачи многозначны, так как эвристические неопределённости трудно формализовать и придать им логический смысл. Многие учёные предпринимали попытки формализации эвристики, но в конечном счёте они сводились к разработке процедур, направленных на формализацию и придание логических форм неопределённости, выполняющихся при активизировании данного узла. В результате разработанной стратегии, системы с эвристической неопределённостью занимали всё большую часть в экспертных системах.

Большим прорывом создания экспертных систем послужило применение в 1981 году, нейронных сетей, в качестве представления знаний. Особый интерес вызвало сравнение и применение нейронных сетей с принципами организации функционирования головного мозга человека.

В современной науке кора головного мозга человека представлена множеством нейронов 10^{10} и нейронных сетей, поэтому в технических системах, в которых предпринимается попытка воспроизвести подобную сеть, при помощи программ, она носит название нейронных сетей. Нейронные сети объединяют нейроны, которые состоят не из простых числовых значений, а из гораздо более примитивных символов – информационных единиц, поэтому подход к формированию таких сетей, называют несимволическим или суб-символическим. Нейрон можно заменить некой программой, структура которой записана в виде символов.

Для реализации нейронной сети на программном уровне, удобнее всего представить её в виде ориентированного графа. Узлы графа будут заменять нейроны, а рёбра между узлами будут заменять нейронные связи. Динамический характер

нейронной сети выражается временем [45], и на программном уровне отразить эту динамику можно представлением параметров узла при последовательном прохождении сети, причём новое состояние узла будет зависеть от предыдущего состояния возбуждения нейронов. Сложность представления распределённых знаний заключается в том, что их нельзя представить в виде строго сформулированных правил, поэтому в нейронных сетях информация выполняется суб-символическая обработка информации. Информация носит не явно выраженный смысл и не может быть оформлена как синтаксическая структура.

Решением этой проблемы является представление знаний фреймами. Поскольку представление знаний с помощью фреймов, может описать процесс мышления человека, то и на программном уровне использование фреймов позволит представить распределённые знания во взаимосвязанных фактах и процедурах. Представление распределённых знаний с помощью фреймов позволит правильно поставить задачу, для получения качественного результата.

Широкое применение в современной науке находят методы классификации систем, основанные на теории классов и объектов. Знания в таких системах представлены абстракцией множества предметов реального мира.

При рассмотрении задач эксплуатации оборудования, операторы сталкиваются с неточной информацией. Информация предоставляется из различных источников неопределённого использования и носит неточное толкование интересующей области знаний из конкретной ситуации. Мак-Карти и Хейс утверждали, что теория вероятности не позволяет решать подобные задачи, в связи с чем, возникла целое направление в науке, посвящённое нечёткой логике, которое стало активно использоваться в системах искусственного интеллекта [46].

Используя теорию графов и представляя знания в виде нейронных сетей и фреймов, требования к экспертному регулятору для диагностики электрооборудования можно представить в следующем виде:

1. Интерфейс программы должен быть удобен, прост в применении и интуитивно понятен, в виду того, что использовать программу будут специалисты

различного уровня подготовки и не обладающие компетенциями в программировании;

2. Экспертный регулятор должен предоставлять неоднозначный вывод знаний, предполагающий различные варианты решений и включать их взаимоисключение;

3. База знаний регулятора должна запоминать сделанные выводы о происходящих ситуациях, но вместе с тем запоминать информацию, подтверждающую ранее сделанные выводы или опровергающую их;

4. Представление данных в структуре регулятора должно быть строго иерархично, для ускорения вычислений;

5. Программные средства для работы с теорией графов, должны быть использованы в полной мере, вместе с рекурсией и другими средствами, позволяющими представлять табличные данные реляционной базы данных;

6. Для осуществления самообучения системы регулятора, он должен быть снабжён механизмом, позволяющим накапливать опыт эксплуатации электрооборудования и самостоятельно вносить изменения в свои знания на основе истории эксплуатации однотипного электрооборудования путём сравнения и сопоставления полученных знаний;

7. В своей работе регулятор должен самостоятельно без участия человека использовать накопленную информацию о происходящих ситуациях и с их помощью получать новые знания.

Для решения задач диагностики электрооборудования представление знаний в виде семантических сетей не является оптимальным. Нейронные сети более подходят для этого решения, но из-за представления в них знаний в виде разнонаправленных наборов правил и условий, они не могут быть интерпретированы для внешней программы, поэтому наиболее оптимальным является представление базы знаний диагностики электрооборудования в виде фреймов. Сложность описания знаний в виде фреймов заключается в многообразии наследственных свойств диагностируемых объектов, но от продукционных правил, отличающихся простотой представле-

ния и применения многими экспертами, их отличает возможность перехода экспертной системы к использованию механизма нечёткой логики, что позволяет расширить возможность их применения для решения задач диагностирования высоковольтного электрооборудования.

1.3 Анализ эффективности систем управления и диагностики

Анализ эффективности рассмотренных систем управления выполнен применительно к условиям эксплуатации электрооборудования и трансформаторов в системах электроснабжения 10-220 кВ алюминиевой промышленности. В качестве критериев эффективности были рассмотрены следующие позиции:

- 1) Информационная доступность систем;
- 2) Адаптация систем к условиям алюминиевой промышленности в России;
- 3) Наглядность восприятия и удобство в эксплуатации;
- 4) Возможность использования существующих датчиков нижнего уровня (периферийных систем);
- 5) Скорость и достоверность обработки архивных данных с получением достоверного вывода;
- 6) Самообучаемость системы в случае возникновения нестандартной ситуации (в случае нечёткого вывода);
- 7) Возможность интеграции в систему управления ремонтами;
- 8) Качество диагностики электрооборудования.

В таблице 1 приведены результаты анализа по вышеуказанным критериям [47].

Таблица 1 - Анализ сравнения различных систем управления и диагностики по критериям эксплуатации электрооборудования и трансформаторов 10-220 кВ в системах электроснабжения алюминиевых заводов

№ п/п	Критерий	УСПД RTU-325	MES-система	SCADA-система	Экспертная система
1	Информационная доступность систем	нет	нет	да	да
2	Адаптация систем к условиям алюминиевой промышленности в России	да	нет	да	да
3	Наглядность восприятия и удобство в эксплуатации	нет	нет	да	да
4	Возможность использования существующих датчиков нижнего уровня (периферийных систем)	да	да	да	да
5	Скорость и достоверность обработки архивных данных с получением достоверного вывода	нет	нет	нет	нет
6	Самообучаемость системы в случае возникновения нестандартной ситуации (в случае нечёткого вывода)	нет	нет	нет	нет
7	Возможность интеграции в систему управления ремонтами	нет	да	нет	да
8	Качество диагностики электрооборудования	нет	да	да	да
9	Количество положительных функций	2	3	5	6
10	Соответствие поставленным задачам	Минимальное соответствие	Минимальное соответствие	Среднее соответствие	Максимальное соответствие

На основании данных, представленных в таблице 1, можно подчеркнуть следующее:

- наилучшую адаптацию к условиям эксплуатации электрооборудования и трансформаторов в системах электроснабжения 10-220 кВ алюминиевой промышленности имеет экспертная система с экспертным регулятором;

- основными недостатками данной системы является отсутствие функции самообучения, скорости и качества обработки массива данных;

- систему с максимально приближённым набором функций можно доработать на основе знаний о нетиповых аварийных ситуациях, полученных на основе диагностики электрооборудования и трансформаторов.

1.4 Выводы по первой главе

Таким образом, вышеизложенный материал позволяет сделать следующие выводы:

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. Все нетиповые знания приводят к появлению выводов о состоянии электрооборудования, основываясь на нечёткой логике.

2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАТОРОВ В СХЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 10-220 кВ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМА САМООБУЧЕНИЯ

Для вывода решения при возникновении аварийной ситуации применено понятие нечёткого вывода, когда неизвестно решение о дальнейшей эксплуатации. Для формирования чёткого вывода применено понятие наборов условий, при совпадении которых формируется решение в стандартной ситуации. На основании появления нечёткого вывода в большинстве аварийных случаев при эксплуатации электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности усовершенствован механизм самообучения графа знаний путём соединения оснований графа, чем достигается нечётное количество вершин графа. Нечётное количество вершин графа знаний позволило повысить эффективность работы экспертной системы путём формирования новых правил чёткого вывода.

2.1 Логический смысл экспертной системы

При работе системы управления и диагностики электрооборудования и трансформаторов 10-220 кВ существуют наборы условий, при сравнении которых мы сможем сделать определённый вывод о состоянии оборудования или необходимости его ремонта [48]. Причём когда этот вывод чёткий, то и решение может быть понятным и быстро достигаемым. В большинстве же ситуаций вывод не всегда бывает чётким. Такое случается тогда, когда неизвестны все измеряемые параметры или когда недостаточно имеется условий для сравнения с возникшей аварийной ситуацией.

Целью работы экспертной системы является получение определённого решения о состоянии электрооборудования и трансформаторов или о необходимости их ремонта в зависимости от возможного вида повреждения и в первую очередь оцен-

ка возможности появления нестандартного аварийного состояния, нестандартной аварии, то есть нечёткого вывода [49]. В результате работы системы осуществляется движение по графу знаний, который в основном содержит знания о стандартных аварийных состояниях электрооборудования и трансформаторов, что является базовыми знаниями экспертной системы. В случае, если достигается ряд вершин, система формирует чёткий логический вывод, если не достигается ни одной вершины, тогда система констатирует отсутствие знаний, которые бы дали ответ на сложившуюся ситуацию, то есть нечёткий вывод [50].

Движение по графу знаний осуществляется следующим образом: вначале происходит процедура проверки узла графа, т.е проверяется группа наборов условий, принадлежащая данному конкретному узлу. Эта группа условий считается истинной, если оказывается истинным хотя бы один набор условий этой группы.

Процедура проверки наборов условий различна для наборов условий с числовым параметром и с нечисловыми параметрами. Для наборов условий с числовым параметром необходимо выполнение всех условий набора условий. Это является условием попадания значения в тот интервал, который предусмотрен условием [51]. Например, если значение параметра оказалось правее левой границы интервала, но также правее правой границы, то нельзя говорить о том, что условие попадания значения параметра в интервал соблюдено.

Для наборов условий с нечисловыми параметрами должно сработать хотя бы одно условие. После успешной проверки группы наборов условий можно осуществлять дальнейшее движение по графу. Каждый узел в графе (кроме корневого) имеет одного предка и может иметь более одного потомка. Предок - узел, который связан ребром с данным узлом и находится ближе данного узла к корню дерева [52]. Потомок - узел, связанный ребром с данным узлом, находящийся дальше данного узла от корневого узла. Каждый узел может иметь одного предка и более одного потомка. Корневой узел не имеет узла-предка. Соответственно, после успешно проверенного узла движение осуществляется по одному из ребер, ведущих к определен-

ному потомку этого узла. Далее проверяется узел-потомок по тому же алгоритму, что и его предок.

В случае неудачи проверки узла потомка, т.е. при отрицательном результате проверки всех его наборов условий, программа возвращается обратно к узлу-предку, после чего осуществляется движение к другому потомку узла-предка.

Можно сформулировать условие движение по графу от узла к узлу в направлении "от корня" как совокупность двух утверждений:

- 1) группа наборов условий данного узла успешно прошла проверку;
- 2) все узлы-предки данного узла также успешно прошли такую же проверку.

Выполнение второго условия является причиной того, что проверка данного узла началась, выполнение первого условия позволяет осуществить дальнейший перебор узлов потомков [53].

Легко видеть, что будет осуществлен возврат в корневой узел независимо от того, была ли достигнута хотя бы одна вершина или не было достигнуто ни одной, т.е. не сработало ни одного правила. Результатом работы системы на данном этапе будут являться те вершины графа, которых удалось достичь.

Если в результате работы системы не было достигнуто вершин, результатом будет ответ системы, что она не располагает знаниями для данной ситуации. То есть эксперты должны оценить сложившуюся ситуацию или её возможность, разработать технические и организационные решения по её устранению и внести данный алгоритм в экспертную систему. Если вершины были достигнуты, то информация об этом хранится в специальном списке достигнутых вершин, обработка которого начинается после возврата в корневой узел дерева правил.

Каждая вершина графа представляет собой группу наборов условий, как и любой узел графа. Отличительной особенностью вершины является то, что в ее группе наборов условий имеется лишь один набор условий. То есть вывод может содержать противоречивые значения параметра, но он не будет ни при каких усло-

виях содержать более одного наименования параметра. В противном случае мы будем иметь ситуацию, когда система не только дает неоднозначный ответ на вопрос, но отвечает сразу на несколько вопросов при условии, что был задан только один, поэтому ограничение на группу наборов условий вершины графа в один набор является необходимым [54].

Наборы условий являются вершинами графа. При наборе условий нечисловых параметров, их названия сравниваются с их значениями, и при их совпадении ставится знак «равно». Набор условий в вершине графа является единообразным и его название будет всегда одинаково для всех условий.

2.2 Создание статистической базы и механизм самообучения системы

Экспертная система делает чёткий и нечёткий выводы. После получения нечёткого вывода эксперт проводит анализ полученной информации и выносит окончательное решение. Эксперт может назначить дополнительное техническое обследование электрооборудования, подробно изучить техническую документацию и провести экспертный совет по проверке проектной документации. Критериями дополнительных проверок эксперта могут являться неоднозначные выводы при возникновении нестандартных или аварийных ситуаций, когда при последовательном следовании решаемых правил возникают не подходящие под факты и правила решения. Решение эксперта при анализе нечёткого вывода записывается в базу знаний экспертного регулятора как получение уже качественного вывода для дальнейшей работы в качестве нового чёткого вывода [55]. Информация о получении качественного вывода записывается в вершину графа знаний. Формирование нечёткого вывода и анализ полученных результатов экспертом, является гипотезой и при повторении подобного случая при соответствии фактов, на основании которых эксперт проводит анализ о состоянии электрооборудования, гипотеза подтверждается и может формироваться чёткий вывод.

Корректировка гипотезы проводится и при опровержении её и при совпадении. В любом случае гипотеза, выдвигаемая экспертом это информация о проведённой работе экспертной системой, но неоднозначность полученных результатов даёт больше вариантов

для принятия решения о чётком или нечётком выводе системы. Как говорилось ранее, нечёткий вывод может быть числовым или нечисловым значением. Определение качественного или количественного вывода так же расширяет возможность для принятия решения экспертом. Вся информация вносится в архив экспертного регулятора для формирования статистики. Накопление статистики для нечисловых параметров путём параметрической оптимизации проводится в экспертной системе для конкретной ситуации [56]. Сформированный нечёткий вывод с нечисловыми значениями, об эксплуатационном состоянии электрооборудования, рассматривается экспертной системой в представленном в таблице 2 виде.

Таблица 2 – Пример нечеткого вывода для нечислового параметра

Альтернатива нечеткого вывода	Относительный вес альтернативы
1) Оборудование необходимо срочно вывести из эксплуатации	20%
2) Оборудование нужно вывести из эксплуатации через один-два года	40%
3) Оборудование может оставаться в эксплуатации, необходимости в ремонте нет	40%

Данный вывод получен при использовании фактов и правил. Факты и правила, задействованные при решении задач по определению чёткого или нечёткого вывода, сохраняются в базе знаний системы. При чётком выводе правила сохраняются в системе как основные и при решении подобной задачи, они формируют чёткий вывод. При получении нечёткого вывода правила так же сохраняются в системе для их последующего применения при подтверждении результатов в дальнейшем [57]. Могут возникать ситуации, при которых по данным правилам выводы никогда не подтвердятся, но так же существуют множество ситуаций, при которых постоянно возникают правильные подтверждающие выводы и со временем, ситуация может измениться и ответ на неё станет очевиден.

Предположим, что оборудование вышло из строя через полгода после того, как был получен нечеткий вывод о его состоянии в таблице 3. Очевидно, что в таком случае правильным был вывод о срочном ремонте оборудования. Когда вывод делается, он является сам по себе нечетким, неоднозначным, а следовательно, спорным [58]. Однако последующие события могут скорректировать эту неоднозначность.

Эксперт анализирует получение нечёткого вывода и вносит информацию в систему. Далее отмечается, какая из альтернатив сработала. Информация о сработавшей альтернативе нечёткого вывода сохраняется в базе знаний экспертного регулятора и в дальнейшем экспертная система применяет эту информацию сработавшей альтернативы и присваивает обновлённые веса вершинам графа знаний, способствующих получению нечёткого вывода. Числовой параметр весов сработавшей альтернативы является счётчиком подтверждающим правильность выдвинутой экспертом гипотезы. Особенным моментом является то, что не правило выдвинуло эту альтернативу, а практика работы с электрооборудованием подтвердила правильность выдвинутой гипотезы. Альтернатива добавляется в вершину графа знаний и вес её правильности при первичном срабатывании такого вывода в правиле будет равен 1.

Дальнейшим результатом работы системы будет получение скорректированных групп правил. Данные правила будут со скорректированными весами. Качество результата системы будет зависеть от количества корректировок правил, причём чем больше будет корректировок правил, тем более адекватными будут правила.

Система хранит всю информацию по скорректированным правилам. Хранение сработавших правил основано на архивировании тех фактов, по которым произошло совпадение условий вершин графа знаний. Этот процесс необходим для механизма самообучения системы. Данное условие необходимо для повышения качества работы системы в целом, для идентификации дефекта и оборудования и диа-

гностики периода его аварийного выхода из строя [59]. Нечеткий вывод пользователь получит в форме интервалов (или интервала) со своими статистическими центрами и вероятностями попадания в эти интервалы. Каждый из них будет являться множеством интервалов, но как результат вывода эти множества будут выглядеть как интервалы, пример представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Пример нечеткого вывода для числового параметра

№ интервала	Левая граница интервала (дни)	Правая граница интервала (дни)	Статистический центр интервала	Вероятность попадания в интервал
1	3	5	2.3	23%
2	20	25	22.4	62%
3	50	60	53.2	15%

Получив такой нечеткий вывод, пользователь системы принимает определенное решение. Информация о действиях системы заносится в базу данных и сохраняется. Сохраняется вся информация о фактах, поступивших в систему при получении данного вывода, и о правилах, задействованных при этом процессе.

Вполне возможно, что спустя определенное время станет доступной информация о том, что, например, оборудование вышло из строя спустя 3,5 дня [60]. Такая информация после ее ввода в систему существенно повлияет на правила, участвовавшие в этом выводе.

Важно отметить, что хотя этот срок попадает в интервал 1 в таблице 3, который является множеством интервалов, корректировке будут подвергнуты все правила всех множеств интервалов из таблицы 3. Это следует из того, что реальный результат был получен при соблюдении всех правил, участвовавших в нечетком выводе. И соответственно каждое правило-участник нечеткого вывода должно быть скорректировано.

Обновление правила, условиями которого являются числовые параметры, происходит следующим образом:

1) Если реальный результат попадает в интервал данного вывода, тогда не происходит корректировки границ интервала, если же результат лежит вне границ интервала, то происходит изменение левой или правой границ интервала, так чтобы результат оказался в границах скорректированного результата. Если результат лежит левее левой границы интервала, то интервал расширяется влево до достижения точки, соответствующей реальному результату, то же самое происходит и в случае, когда результат лежит правее правой границы интервала.

2) Добавляется единица к счетчику срабатываний правила.

3) Происходит смещение статистического центра интервала.

В результате может иметь место существенное расширение интервала и определенный сдвиг середины интервала вправо или влево. Середину интервала можно назвать геометрическим центром интервала, соответственно мы можем получить ощутимое смещение геометрического центра интервала и гораздо меньшее смещение статистического центра интервала.

После того как правила в системе были скорректированы, система продолжает хранить информацию о фактах, при которых были задействованы правила. Полученная информация необходима для самообучения системы [61]. Началом работы механизма самообучения экспертного регулятора является новая оптимизация правила экспертной системы. После параметрической оптимизации правила вершины графа, происходит потребность в корректировке действующего правила и возникает новое правило.

Механизм самообучения выполняет первое действие проверкой наличия подходящих условий в описании правила для обнаруженного процесса. Для формирования нового правила раскладывается ветвь графа знаний, приведённая на рисунке 3.

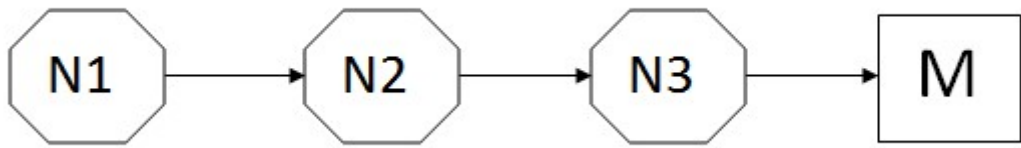


Рисунок 3 - Правило как элемент графа знаний в экспертной системе

N1-N3 - узлы графа знаний, M - нечеткий вывод правила.

Каждому узлу графа будет соответствовать совокупность наборов условий, которая обеспечивает функцию логического "ИЛИ" как внутри набора условий, так и между наборами условий (рисунок 4).

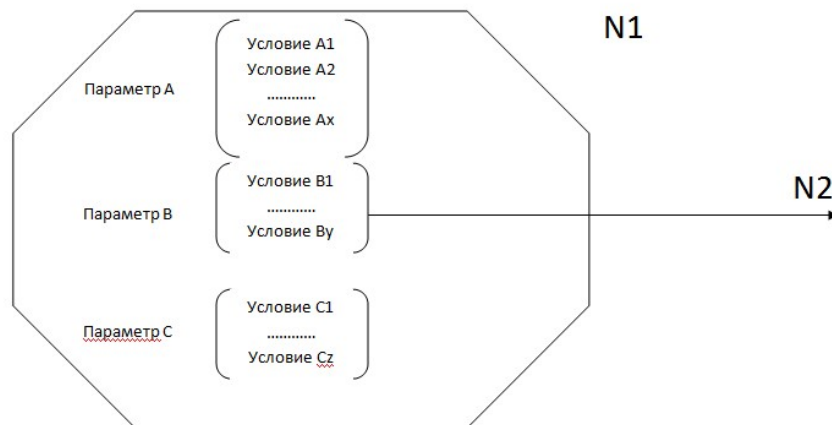


Рисунок 4 – Узел подграфа знаний как элемент правила на примере узла N1

Иначе говоря, на рисунке 4 сформулирована логика: если истинно хотя бы одно из условий для любого из параметров узла N 1, то истиной считается данный узел подграфа знаний.

Функцию логического "И" реализуют рёбра подграфа. Для того чтобы подграф знаний считался истинным, необходимо, чтобы были истинными все узлы подграфа. Если хотя бы один узел будет признан неистинным, истинность остальных узлов графа не будет иметь значения.

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. Рассматривается статистика, накопленная экспертной системой для конкретного правила. Эта статистика представляет собой набор конкретных ситуаций, которые имели место и которые укладывались в рамки данного правила. Одно правило может охватывать достаточно большое количество ситуаций, например, в правиле, представленном подграфом, состоящим из трех узлов и вершины вывода (рисунок 5), каждый из трех узлов включает в себе 10 альтернативных условий, а вершина вывода имеет 4 альтернативных варианта вывода.

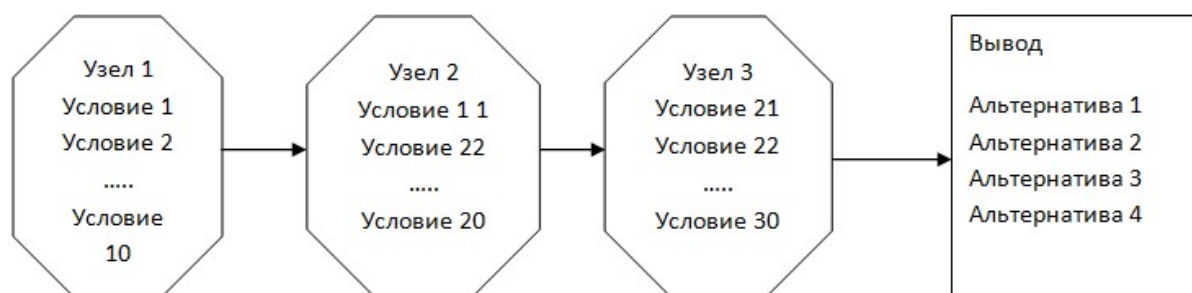


Рисунок 5 – Множество ситуаций, подпадающих под одно правило

Легко видеть, что для рисунка 5 получим $4 \cdot 10^3$ ситуаций, в которых данное правило может сработать. Статистика экспертной системы накапливает данные для тех ситуаций, которые реально имели место.

Чтобы говорить о повышении эффективности правил в экспертной системе, нужно ввести оценку эффективности правила как основного. Предлагается ввести оценку, основанную на доле доминанты среди альтернатив вывода. Доминантой (D) предполагается назвать альтернативу нечеткого вывода с наибольшим весом.

Если доля доминанты равна 100%, это говорит о полной однозначности правила и является идеальным случаем. Чем доля доминанты ниже, тем менее эффективно правило, то есть чем менее однозначен вывод правила, тем менее эффективно правило.

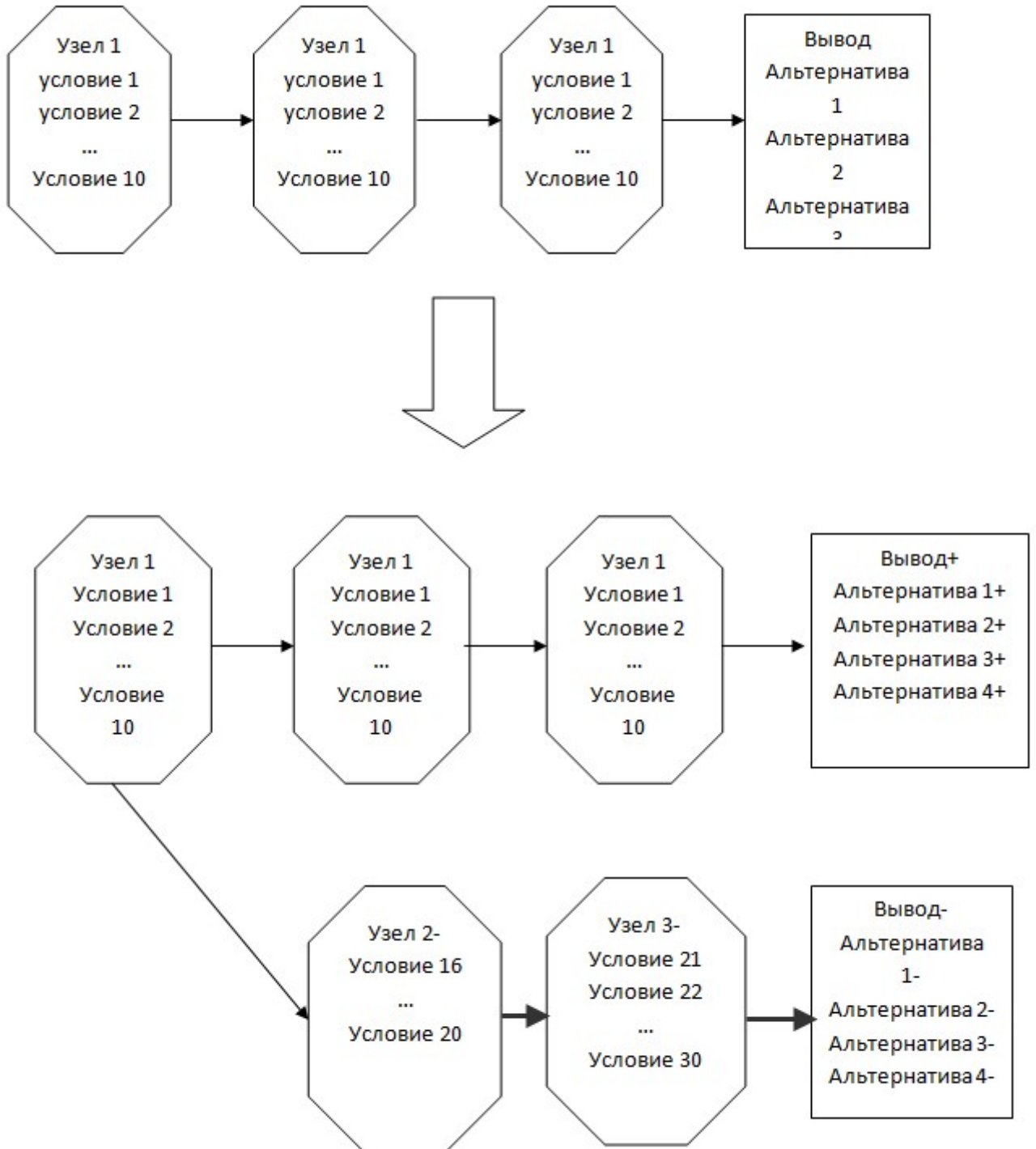


Рисунок 6 – Работа механизма самообучения

Результат самообучения предполагает создание двух правил из одного, средняя эффективность которых будет выше эффективности исходного правила. Получение двух правил из одного и есть работа механизма самообучения, рисунок 6. Узел 3 на рисунке 6 был разделен на два узла, имеющих новые наименования, но полностью наследующие набор условий узла 3. Исходный вывод правила преобразовался в два вывода, отличных от исходного. Количество альтернатив вывода в выводе+ и выводе – осталось прежним, таким же, как и в исходном выводе, изменились лишь весовые коэффициенты альтернатив вывода. Существенным моментом является то, что доминанты D вывода+ и D вывода будут иметь новые весовые значения.

Получение двух правил из одного осуществляется тогда, когда эффективность хотя бы одного из двух новых правил будет выше эффективности исходного правила:

$$D_{\text{исходная}} < D_{+/-} \quad (1)$$

На рисунке 6 узел 1 оказался неизменным, узел 3 по сути продублированным, а узел 2 разделенным на два узла. Назовем это разветвлением правила. Каковы причины, по которым был выбран именно этот узел, а не узел 3 или 1. Прежде чем сделать такой выбор, механизм самообучения сделал проверку для всех узлов подграфа знаний. Для роли узла 2 выбирается тот узел, который обеспечит разветвление правила, для которого неравенство (1) будет наибольшим. Также важно разбиение исходного набора условий узла 1 на поднаборы условий для узла 1– и узла 1+. На рисунке 6 имеет место разбиение на две подгруппы по нескольким условиям; это могло бы быть разбиение на 4 и 6 условий и даже на 9 и 1 условие. Единственным критерием является неравенство (1), которое должно быть наибольшим среди всех возможных разбиений в рамках данного подграфа знаний:

$$\max (D_{+/-} - D_{\text{исходная}}) \quad (2)$$

Рассматривается анализ эффективности возможного разбиения группы условий на две подгруппы для произвольно выбранного узла, например, узла 1 с рисунка 6. Программой предусмотрено, что экспертная система сохраняет в своей базе знаний все происходящие с ней ситуации и набирает соответствующую статистику. Правила

формируются на статистике по которой есть подтверждённые выводы. По неподтверждённым выводам формируется своя база знаний и при дальнейшем их подтверждении они переводятся в правила. Пусть в системе хранится N ситуаций для данного правила, которые получили подтверждение. Для каждой из этих ситуаций имеется фактическое значение параметра (факт), которое удовлетворяет одному из условий узла 1. Наличие такого значения необходимо, иначе эта ситуация не привела бы к срабатыванию именно этого правила. Более того, можно утверждать, что в общем случае в разных ситуациях, для которых справедливо правило, для узла 1 факты могут повторяться [62]. Таким образом, можно для каждого условия узла 1 получить число, являющееся количеством повторного появления этого конкретного факта в разных ситуациях.

Для каждого из возможных вариантов разбиения группы на две подгруппы выполняется определенная процедура проверки. Для каждого элемента m_i из исходной группы, где $i = 1, M$, имеется число, назовем его f_i , соответствующее частоте попадания этого конкретного факта в ситуации, получающие впоследствии корректировку вывода. Проверка заключается в сопоставлении суммы частот появления фактов из одной подгруппы с суммой частот другой подгруппы. В результате получаем число F , характеризующее близость этих подгрупп по количеству фактов встречавшихся экспертной системе,

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{\sum_{j=n}^M f_j + \sum_{t=1}^n f_t} \quad (3)$$

Теперь, получив величину, характеризующую долю первой подгруппы в общей сумме частот появления фактов из обеих подгрупп, можно получить величину w , характеризующую в процентном отношении разброс между подгруппами по суммарной величине появления фактов в этих подгруппах:

$$w = |F - 0,5| * 100 \quad (4)$$

Величина w равняется в лучшем случае нулю. Для реальных ненулевых значений вводится предел, превышение которого не позволяет проводить такое разбиение. Предлагается ввести предельное значение величины $w=5\%$.

Назовем выполнение условия не превышения величиной w предельного значения условием симметричности разбиения группы фактов на две подгруппы. Когда условие симметричности выполнено, можно проверить, будет ли данное разбиение эффективным. Гипотеза того, что это разбиение эффективно, должна быть доказана или опровергнута [63]. С этой целью рассматриваются по очереди обе получившиеся подгруппы.

Все альтернативные ситуации анализируются системой с весами, которые они получили именно в этой подгруппе. Данным альтернативам присваиваются новые веса и новая подгруппа отличается количеством элементов.

Такая же процедура расчета доминанты D_{-} нового правила осуществляется и для второй подгруппы. Когда получены доминанты для новых двух правил, осуществляется оценка эффективности этих двух новых правил по сравнению с исходным правилом по формуле (1). Если неравенство (1) не выдерживается, тогда такое разбиение не будет произведено, если же неравенство (1) выполняется, тогда такое разбиение фиксируется как удачное и продолжается проверка всех остальных вариантов разбиений для данного узла и всех остальных узлов. После того как заканчивается проверка всех узлов на возможность удачного разбиения групп условий, среди удачных разбиений, если такие есть, выбирается разбиение, дающее максимальную среднюю эффективность для двух новых правил.

База знаний постоянно накапливает данные при работе системы. Вместе с тем данные хранятся в памяти системы и используются при срабатывании правила или условия, для которых возможно использование данной информации в иерархической структуре графа чёткого вывода (рисунок 7).

Такая информация – это факты и правила, хранимые экспертной системой при последовательном срабатывании условий и правил системы. При возникновении ситуаций, когда срабатывают определённые правила и условия вершин графа

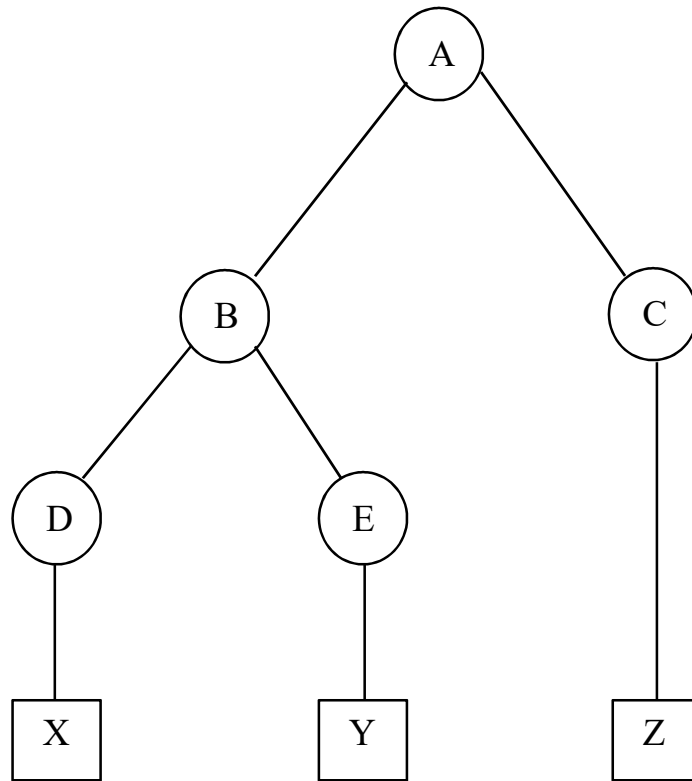


Рисунок 7 – Обычный граф знаний, приводящий к чёткому выводу

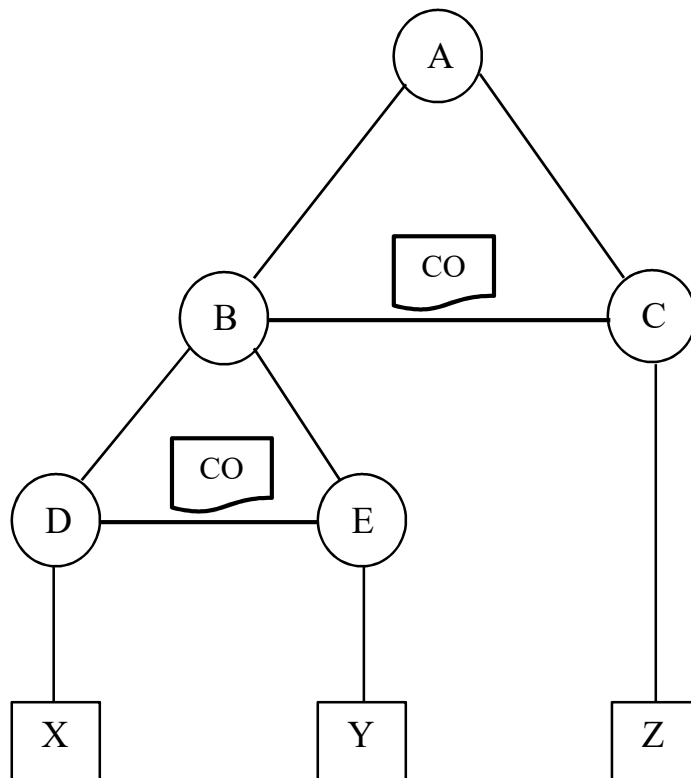


Рисунок 8 – Усовершенствованный граф знаний, решающий процесс самообучения в случае нечёткого вывода

знаний системы, не связанные строгой последовательной иерархической структурой графа знаний, система формирует нечёткий вывод [64].

Как говорилось выше, нечёткий вывод экспертной системы может быть впоследствии скорректирован пользователем системы на основе соединений оснований (СО) узлов графа знаний. Структура усовершенствованного графа знаний приведена на рисунке 8.

Исследования экспертного регулятора по общепромышленным трансформаторам выполнены в достаточном объёме для принятия решений о необходимости их ремонта или дальнейшей эксплуатации [65].

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

2.3 Выводы по второй главе

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 и 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, поддержки принятия рациональных решений по необходимости ремонта или продолжения дальнейшей эксплуатации;

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

3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЭКСПЕРТНОГО РЕГУЛЯТОРА, ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА 10 кВ

Информация о техническом состоянии преобразовательных трансформаторов в достаточном объёме для принятия решений о необходимости его ремонта или дальнейшей эксплуатации в достаточном объёме содержится в результатах анализа на растворимые газы в трансформаторном масле. Следовательно, первоочередной задачей экспертного регулятора является пополнение знаний о состоянии трансформаторного масла. Для этой цели необходимо разработать принципы формирования правил, отражающих концентрацию растворимых газов в масле, в удобном виде для занесения в базу знаний экспертного регулятора и проанализировать работу экспертного регулятора в экспертной системе.

3.1 Принципы формирования правил чёткого вывода для экспертного регулятора по результатам диагностики развивающихся дефектов в преобразовательном трансформаторе

Развивающиеся дефекты в преобразовательном трансформаторе отражаются на качестве трансформаторного масла, следовательно, по результатам хроматографического анализа растворённых газов можно судить о техническом состоянии трансформатора. На основе фактической концентрации растворённых газов, таких как: водород (H_2), метан (CH_4), ацетилен (C_2H_2), этилен (C_2H_4), этан (C_2H_6), оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO_2)- делается вывод о необходимости ремонта трансформатора или его дальнейшей эксплуатации [66]. При частичных разрядах основным газом является H_2 , характерными газами с малым содержанием – CH_4 и C_2H_2 . При искровых и дуговых разрядах основными газами являются H_2 или C_2H_2 , характерными газами с любым содержанием – CH_4 и C_2H_4 . Превышение граничных концентраций CO и CO_2 может свидетельствовать об ускоренном старении и/или увлажнении твёрдой изоляции. При перегревах твёрдой изоляции основным газом является диоксид

углерода. При дефектах электрического характера основные газы: водород – частичные разряды, искровые и дуговые разряды; ацетилен – электрическая дуга, искрение. При дефектах термического характера основные газы: этилен – нагрев масла и бумажно-масляной изоляции выше 600°C; метан – нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур 400-600°C; этан – нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур 300-400°C; оксид и диоксид углерода – старение и увлажнение масла и/или твёрдой изоляции; диоксид углерода – нагрев твёрдой изоляции.

3.1.1 Граничные концентрации растворённых газов в масле

Важным является понятие граничной концентрации того или иного газа. Превышение этой концентрации является первым признаком отклонения поведения оборудования от нормы. Такое оборудование берется под хроматографический контроль с учащенным отбором проб масла. Также есть факторы, которые должны быть учтены при хроматографическом анализе, которые могут существенно снизить или повысить концентрации газов в масле [67]. Достаточно часто изменяется концентрация неопределённого вида газа, а нескольких газов сразу, поэтому экспертный регулятор должен распознавать вид дефекта на основе соотношения определённых газов и сравнивать его с концентрациями растворённых в масле газов бездефектных трансформаторов.

Далее приведены некоторые эксплуатационные факторы, вызывающие увеличение концентрации растворённых в масле газов бездефектных трансформаторов: остаточные концентрации газов от устраненного дефекта во время ремонта трансформатора; увеличение нагрузки трансформатора, проведение сварочных работ на баке, воздействие токов короткого замыкания и т. п.

Также существуют факторы, вызывающие уменьшение концентрации растворённых в масле газов бездефектных трансформаторов: уменьшение нагрузки транс-

форматора; длительное отключение; дегазация масла; частичная или полная замена масла в баке трансформатора и т.д. Допустимая концентрация газов бездефектных трансформаторов представлена в таблице 4.

Таблица 4 – граничные концентрации растворённых в трансформаторном масле контролируемых газов

	Концентрации растворённых газов в трансформаторном масле						
Химическая формула газа, растворённого в трансформаторном масле	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Название газа, растворённого в трансформаторном масле	водород	метан	ацетилен	этилен	этан	оксид углерода	диоксид углерода
Предельная граничная концентрация газа, растворённого в трансформаторном масле, % объёма	0,01	0,01	0,001	0,01	0,005	0,06	0,08

Допустимая концентрация газов бездефектных трансформаторов представлена в таблице 4. Данные, представленные в таблице 4, приемлемы для экспертного анализа, но для занесения их в экспертный регулятор их необходимо преобразовать по следующим принципам формирования общих принципов занесения данных таблицы в экспертный регулятор [68]. Основные принципы: 1) ввод исходных данных; 2) анализ допустимой концентрации или её превышения, в случае не превышения - дальнейшая эксплуатация, в случае превышения – анализ динамики развития дефекта за счёт увеличения количества диагностических измерений, при отсутствии динамики (разовый выброс) дальнейшая эксплуатация с уменьшением по времени контроля диагностических измерений. В случае положительной динамики

вывод трансформатора в ремонт с указанием характерной причины. Ниже приведены разработанные структурные схемы для правил экспертного регулятора, при анализе следующих растворённых газов в масле: 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).

3.1.2 Структурная схема для анализа концентраций водорода - H_2

Вводим правило, дающее ответ на вопрос, превышает ли газ H_2 на рисунке 8, предельно допустимую концентрацию для конкретного трансформатора или не превышает. Тогда нам необходимо сформулировать элементы этого правила:

Правило 1:

- 1) тип трансформатора = ТДЦНП-50000/10
- 2) параметр "название газа" H_2
- 3) параметр "срок службы"
- 4) тип защиты масла = плёночная/воздушная
- 5) коэффициент загрузки = сила тока рабочего, кА
- 6) количество диагностических замеров
- 7) параметр "концентрация газа" $< 0,01$
- 8) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа H_2 " = "не превышена" = дальнейшая эксплуатация
- 9) параметр концентрация газа $> 0,01$
- 10) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа H_2 " = "превышена" = необходимо увеличить число диагностических измерений для определения динамики развития газосодержания водорода H_2
- 11) вывод: "не приводит к увеличению концентрации H_2 " = "снизить количество замеров, контролировать" = дальнейшая эксплуатация
- 12) вывод: "приводит к увеличению концентрации H_2 " = "ремонт = время цикла на ремонт – **4 часа**
- 13) характерные дефекты: нагрев контакта 10 кВ, нагрев контакта 0,8 кВ, нагрев РПН.

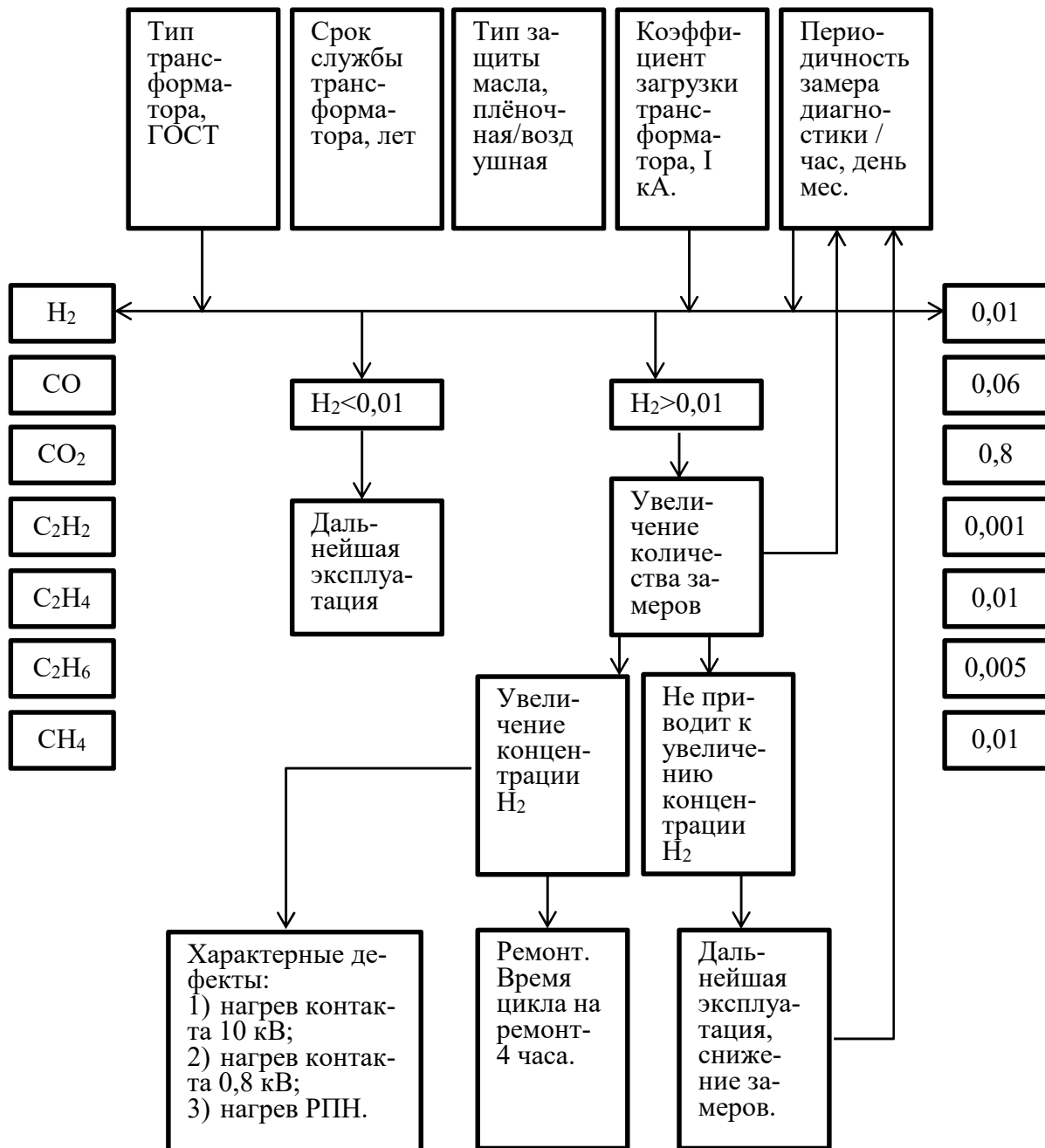


Рисунок 8 – Структурная схема для анализа концентраций водорода H₂

Таким образом, видно, как может быть получено описание правила, приближенное к вводу в экспертную систему, которое в исходной форме занимало одну ячейку в графе знаний экспертного регулятора.

3.1.3 Структурная схема для анализа концентраций диоксида углерода - CO₂

Вводим следующее правило, дающее ответ на вопрос, превышает ли газ CO₂ на рисунке 9, предельно допустимую концентрацию для конкретного трансформатора или не превышает. Тогда нам необходимо сформулировать элементы этого правила:

Правило 2:

- 1) тип трансформатора = ТДЦНП-50000/10
- 2) параметр "название газа" CO₂
- 3) параметр "срок службы"
- 4) тип защиты масла = плёночная/воздушная
- 5) коэффициент загрузки = сила тока рабочего, кА
- 6) количество диагностических замеров
- 7) параметр "концентрация газа" < 0,8
- 8) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа CO₂" = "не превышена" = дальнейшая эксплуатация
- 9) параметр концентрация газа > 0,8
- 10) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа CO₂" = "превышена" = необходимо увеличить число диагностических измерений для определения динамики развития газосодержания диоксида углерода CO₂
- 11) вывод: "не приводит к увеличению концентрации CO₂" = "снизить количество замеров, контролировать" = дальнейшая эксплуатация
- 12) вывод: "приводит к увеличению концентрации CO₂" = сравнить с параметром "срок службы"
- 13) вывод: "срок службы" > 10 лет" = время цикла на ремонт – **2500 часов**

характерные дефекты: износ изоляционной бумаги обмоток трансформатора

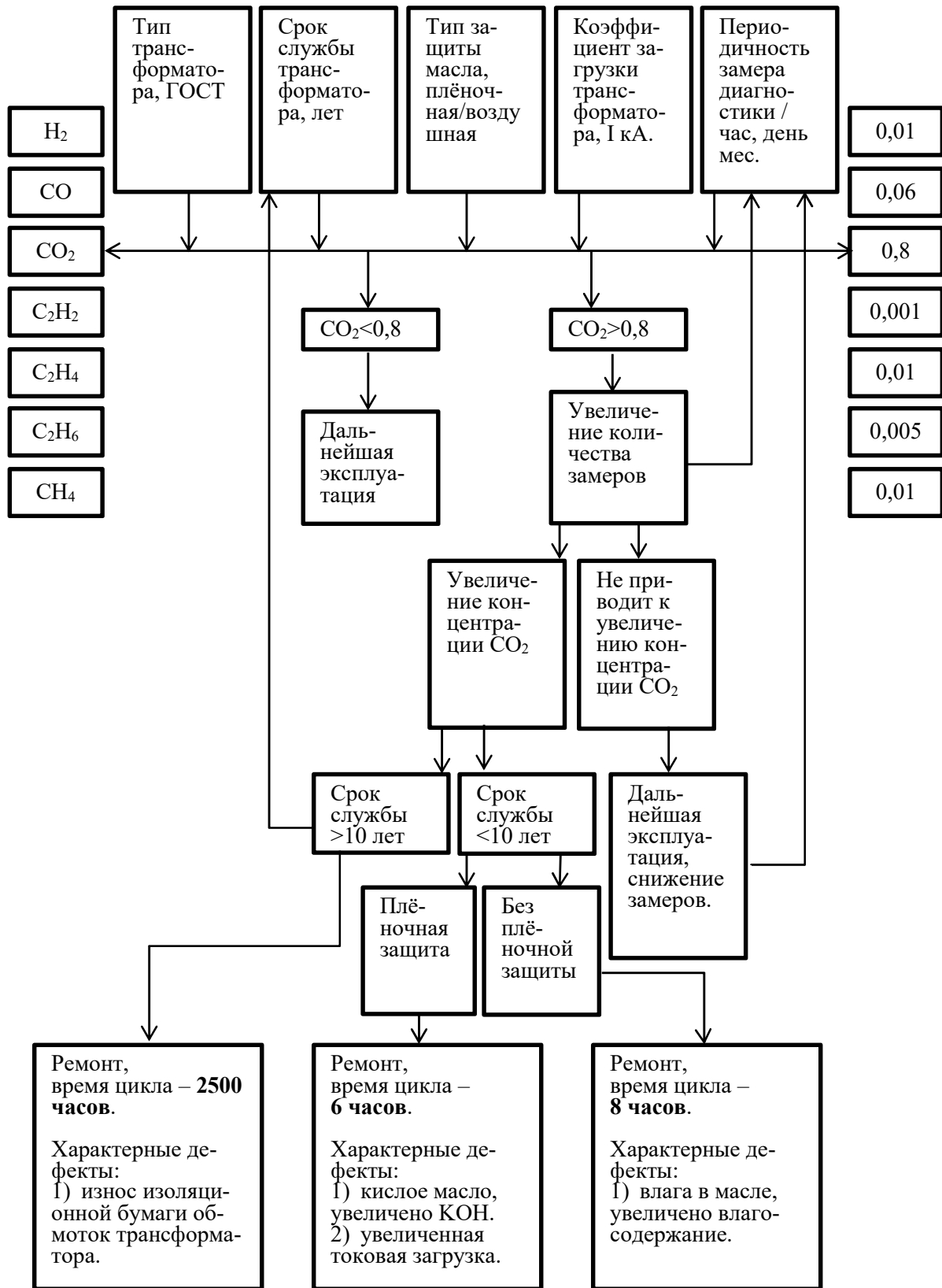


Рисунок 9 – Структурная схема для анализа концентраций диоксида углерода CO₂

- 14) вывод: "срок службы" < 10 лет" = сравнить с параметром "тип защиты масла – плёночная защита/без плёночной защиты"
- 15) вывод: "плёночная защита" = присутствует = время цикла на ремонт – **6 часов**
- 16) характерные дефекты: кислое масло, увеличено КОН; увеличена токовая нагрузка
- 17) вывод: "плёночная защита" = отсутствует = время цикла на ремонт – **8 часов**
- 18) характерные дефекты: влага в масле, увеличено влагосодержание

3.1.4 Структурная схема для анализа концентраций ацетилена - C_2H_2

Вводим следующее правило, дающее ответ на вопрос, превышает ли газ C_2H_2 на рисунке 10, предельно допустимую концентрацию для конкретного трансформатора или не превышает. Тогда нам необходимо сформулировать элементы этого правила:

Правило 3:

- 1) тип трансформатора = ТДЦНП-50000/10
- 2) параметр "название газа" C_2H_2
- 3) параметр "срок службы"
- 4) тип защиты масла = плёночная/воздушная
- 5) коэффициент загрузки = сила тока рабочего, кА
- 6) количество диагностических замеров
- 7) параметр "концентрация газа" < 0,001
- 8) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа C_2H_2 " = "не превышена" = дальнейшая эксплуатация
- 9) параметр концентрация газа > 0,001
- 10) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа C_2H_2 " = "превышена" = необходимо увеличить число диагностических измерений для определения динамики развития газосодержания ацетилена C_2H_2

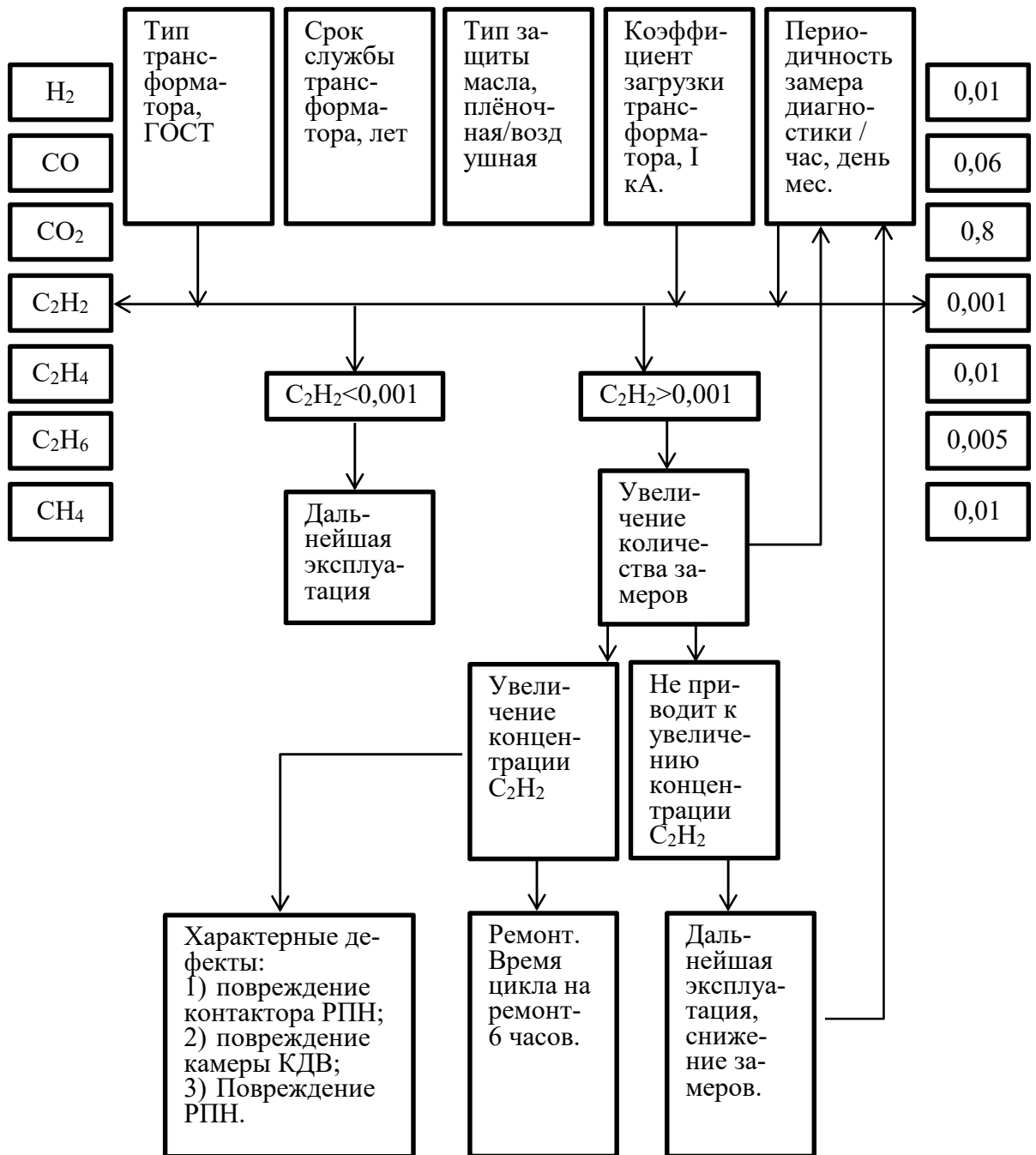


Рисунок 10 – Структурная схема для анализа концентраций ацетилена C_2H_2

- 11) вывод: "не приводит к увеличению концентрации C_2H_2 " = " снизить количество замеров, контролировать" = дальнейшая эксплуатация
- 12) вывод: "приводит к увеличению концентрации C_2H_2 " = " ремонт = время цикла на ремонт – **6 часов**
- 13) характерные дефекты: повреждение контактора РПН; повреждение камеры КДВ; повреждение РПН

3.1.5 Структурная схема для анализа концентраций метана - CH_4

Метан, содержащийся в трансформаторном масле, характерен при дефектах, связанных с нагревом масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур, сопровождающихся разрядами высокого напряжения.

Вводим следующее правило, дающее ответ на вопрос, превышает ли газ CH_4 на рисунке 11, предельно допустимую концентрацию для конкретного трансформатора или не превышает. Тогда нам необходимо сформулировать элементы этого правила:

Правило 4:

- 1) тип трансформатора = ТДЦНП-50000/10
- 2) параметр "название газа" CH_4
- 3) параметр "срок службы"
- 4) тип защиты масла = плёночная/воздушная
- 5) коэффициент загрузки = сила тока рабочего, кА
- 6) количество диагностических замеров
- 7) параметр "концентрация газа" $< 0,01$
- 8) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа CH_4 " = "не превышена" = дальнейшая эксплуатация
- 9) параметр концентрация газа $> 0,01$

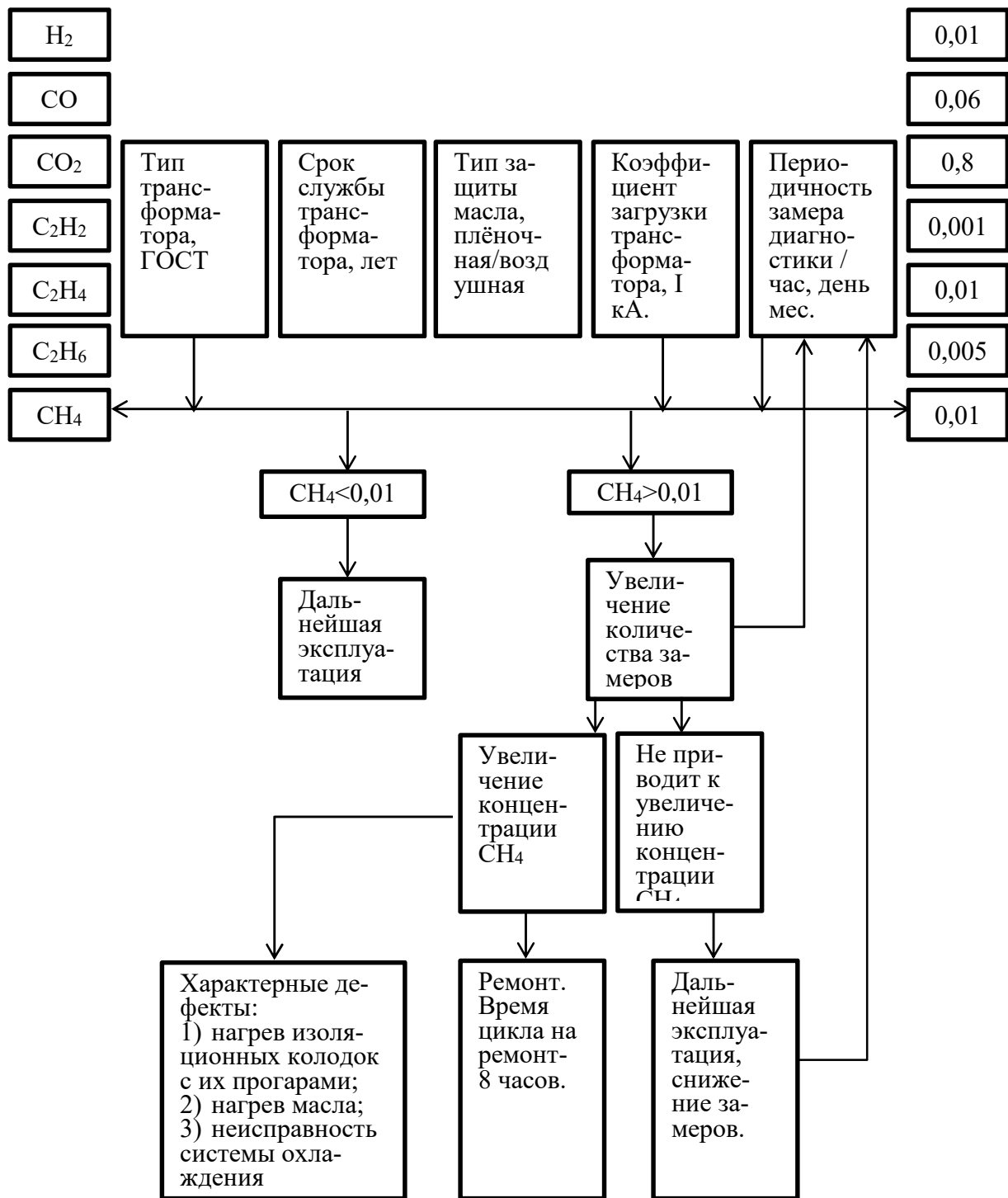


Рисунок 11 – Структурная схема для анализа концентраций метана CH₄

- 10) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа CH₄" = "превышена" = необходимо увеличить число диагностических измерений для определения динамики развития газосодержания метана CH₄
- 11) вывод: "не приводит к увеличению концентрации CH₄" = "снизить количество замеров, контролировать" = дальнейшая эксплуатация

- 12) вывод: "приводит к увеличению концентрации C_2H_4 " = "ремонт = время цикла на ремонт – **8 часов**
- 13) характерные дефекты: нагрев изоляционных колодок с их прогарамии; нагрев масла; неисправность системы охлаждения

3.1.6 Структурная схема для анализа концентраций этилена - C_2H_4

Этилен, содержащийся в трансформаторном масле, характерен при дефектах, связанных с нагревом масла и бумажно-масляной изоляции. Он не является показателем характерного дефекта электрического характера, но в то же время возникновение этого газа свидетельствует о повышенном, выше 600°C , нагреве, который может возникать при дефектах в контактных соединениях, а также при интенсивном нагреве масла из-за перегруза или неисправности системы охлаждения.

Вводим следующее правило, дающее ответ на вопрос, превышает ли газ C_2H_4 на рисунке 12, предельно допустимую концентрацию для конкретного трансформатора или не превышает. Тогда нам необходимо сформулировать элементы этого правила:

Правило 5:

- 1) тип трансформатора = ТДЦНП-50000/10
- 2) параметр "название газа" C_2H_4
- 3) параметр "срок службы"
- 4) тип защиты масла = плёночная/воздушная
- 5) коэффициент загрузки = сила тока рабочего, кА
- 6) количество диагностических замеров
- 7) параметр "концентрация газа" $< 0,01$
- 8) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа C_2H_4 " = "не превышена" = дальнейшая эксплуатация
- 9) параметр концентрация газа $> 0,01$

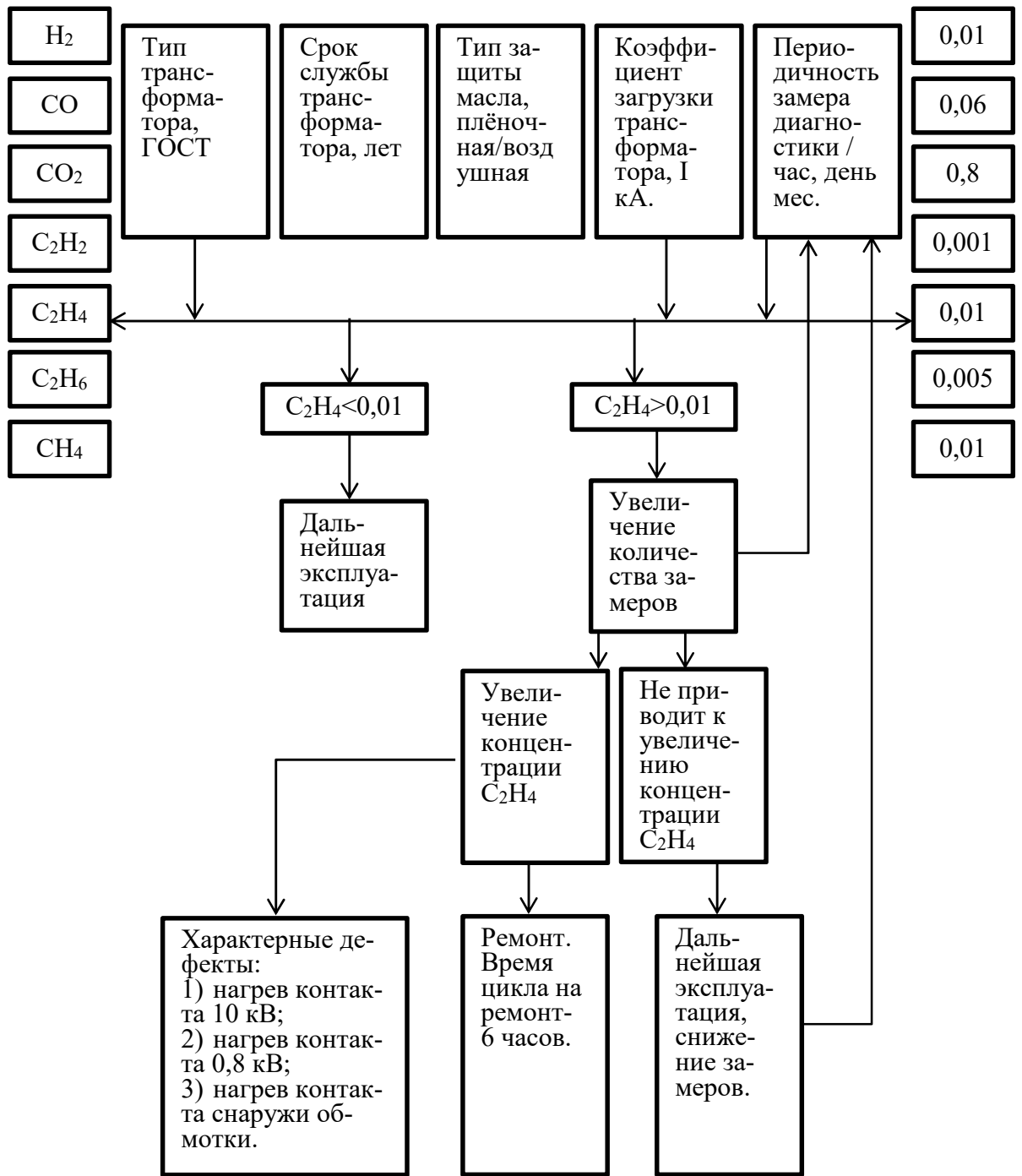


Рисунок 12 – Структурная схема для анализа концентраций этилена углерода C₂H₄

10) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа C₂H₄" = "превышена" = необходимо увеличить число диагностических измерений для определения динамики развития газосодержания этилена C₂H₄

- 11) вывод: "не приводит к увеличению концентрации C_2H_4 " = " снизить количество замеров, контролировать" = дальнейшая эксплуатация
- 12) вывод: "приводит к увеличению концентрации C_2H_4 " = " ремонт = время цикла на ремонт – **6 часов**
- 13) характерные дефекты: нагрев контакта 10 кВ; нагрев контакта 0,8 кВ; нагрев контакта снаружи обмотки

3.1.7 Структурная схема для анализа концентраций оксида углерода - CO

Оксид углерода, содержащийся в трансформаторном масле, характерен при дефектах, связанных со старением и увлажнением масла и твёрдой изоляции. При эксплуатации преобразовательного трансформатора ТДЦНП-50000/10 необходимо следить за влагосодержанием трансформаторного масла, которое не должно превышать 0,025 мг на тонну.

При превышении этого показателя начинает увлажняться трансформаторное масло, а с ним и твёрдая изоляция, что может привести к аварийному отключению трансформатора.

Для уменьшения воздействия влажности окружающего атмосферного воздуха применяют плёночную защиту

Вводим следующее правило, дающее ответ на вопрос о превышении газа CO на рисунке 13, предельно допустимой концентрации для конкретного трансформатора:

Правило 6:

- 1) тип трансформатора = ТДЦНП-50000/10
- 2) параметр "название газа" CO
- 3) параметр "срок службы"
- 4) тип защиты масла = плёночная/воздушная

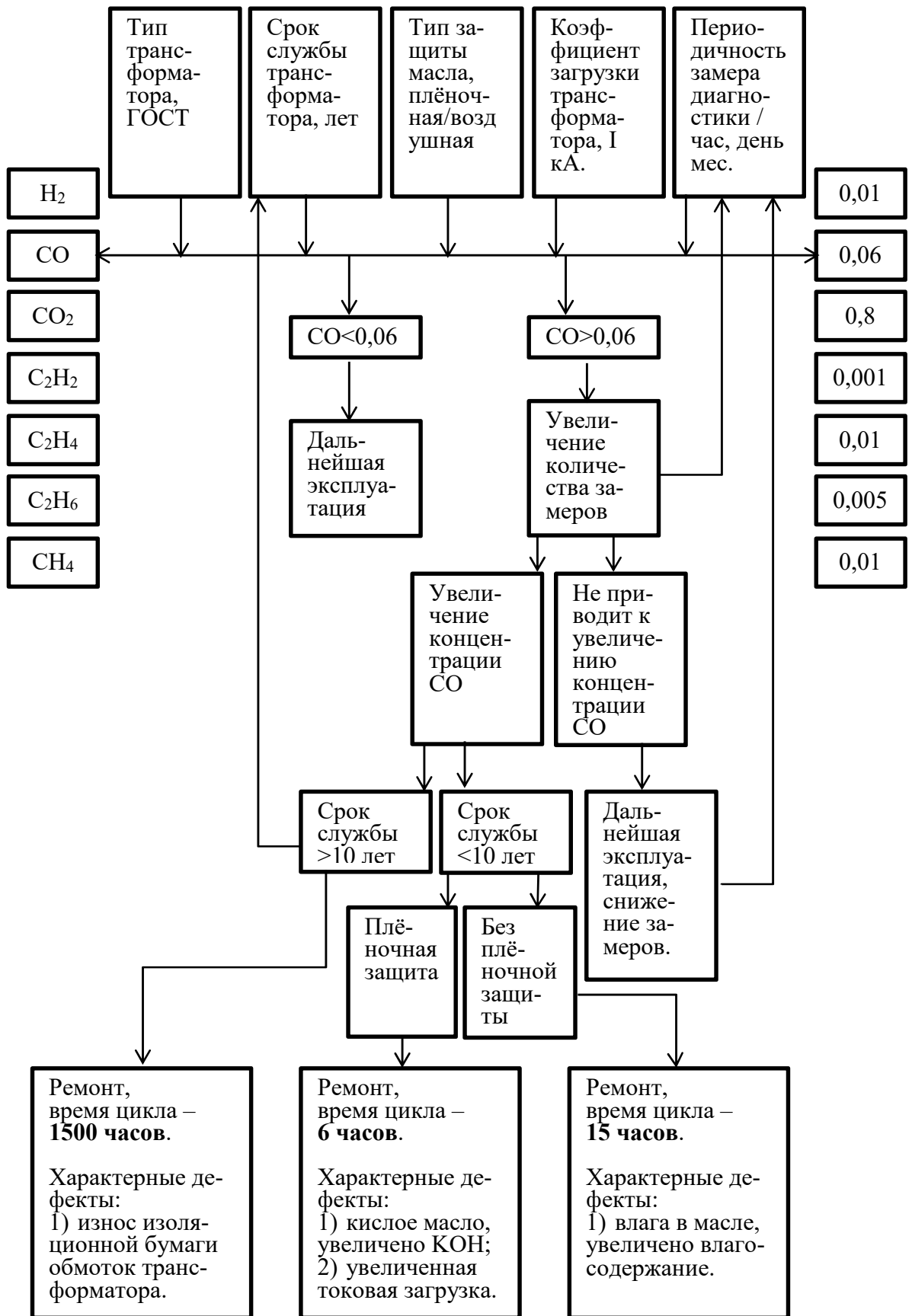


Рисунок 13 – Структурная схема для анализа концентраций оксида углерода СО

- 5) коэффициент загрузки = сила тока рабочего, кА
- 6) количество диагностических замеров
- 7) параметр "концентрация газа" $< 0,06$
- 8) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа СО" = "не превышена" = дальнейшая эксплуатация
- 9) параметр концентрация газа $> 0,06$
- 10) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа СО" = "превышена" = необходимо увеличить число диагностических измерений для определения динамики развития газосодержания оксида углерода СО
- 11) вывод: "не приводит к увеличению концентрации СО" = "снизить количество замеров, контролировать" = дальнейшая эксплуатация
- 12) вывод: "приводит к увеличению концентрации СО" = сравнить с параметром "срок службы"
- 13) вывод: "срок службы" > 10 лет" = время цикла на ремонт – **1500 часов**
- 14) характерные дефекты: износ изоляционной бумаги обмоток трансформатора
- 15) вывод: "срок службы" < 10 лет" = сравнить с параметром "тип защиты масла – плёночная защита/без плёночной защиты"
- 16) вывод: "плёночная защита" = присутствует = время цикла на ремонт – **6 часов**
- 17) характерные дефекты: кислое масло, увеличено КОН; увеличена токовая нагрузка
- 18) вывод: "плёночная защита" = отсутствует = время цикла – **15 часов**
- 19) характерные дефекты: влага в масле, увеличено влагосодержание

3.1.8 Структурная схема для анализа концентраций этана – C_2H_6

Вводим следующее правило, дающее ответ на вопрос, превышает ли газ C_2H_6 на рисунке 14, предельно допустимую концентрацию для конкретного трансформатора или не превышает. Тогда нам необходимо сформулировать элементы этого правила:

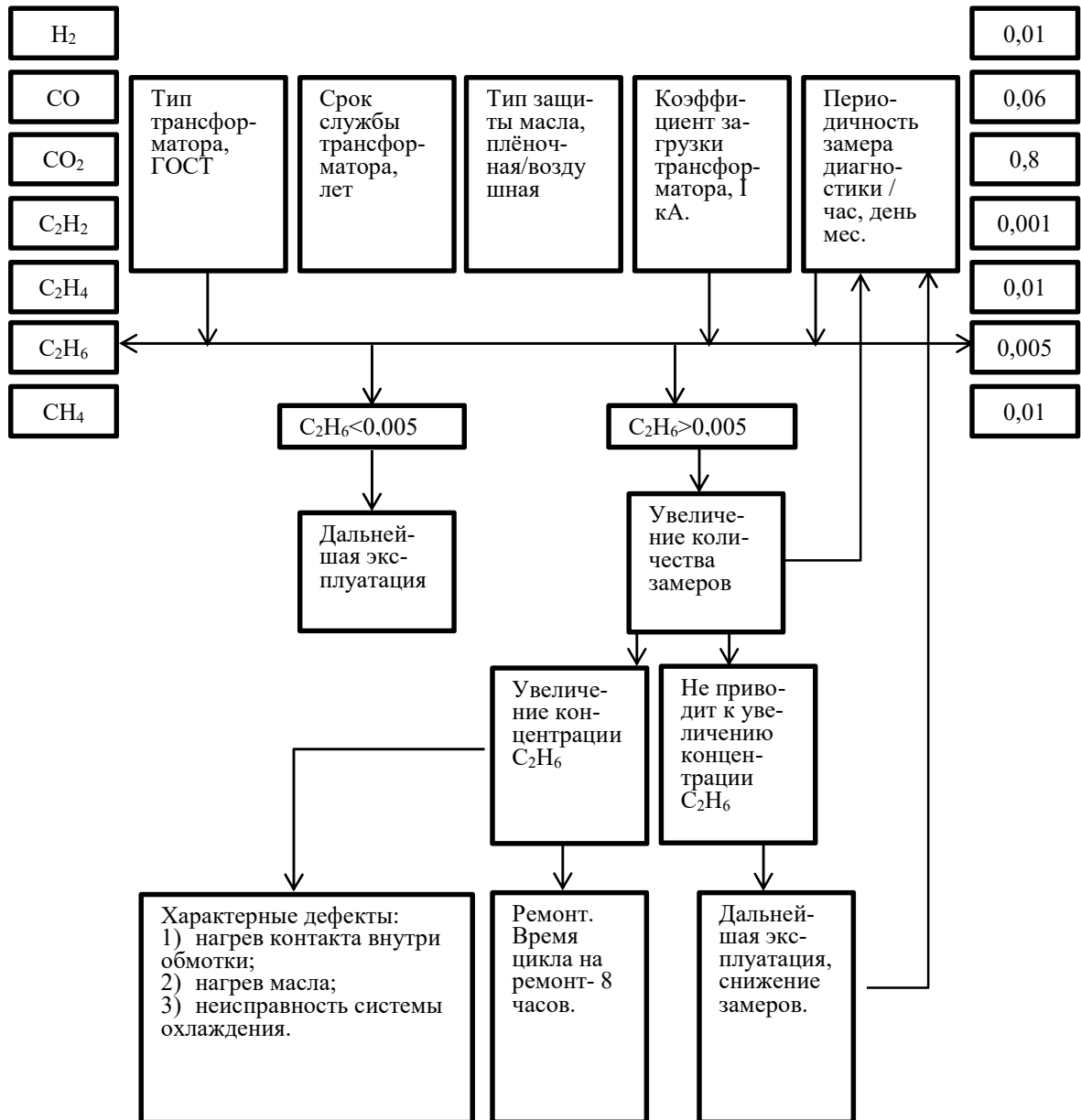


Рисунок 14 – Структурная схема для анализа концентраций этана C_2H_6

Правило 7:

- 1) тип трансформатора = ТДЦНП-50000/10
- 2) параметр "название газа" C_2H_6
- 3) параметр "срок службы"
- 4) тип защиты масла = плёночная/воздушная
- 5) коэффициент загрузки = сила тока рабочего, кА
- 6) количество диагностических замеров
- 7) параметр "концентрация газа" $< 0,005$
- 8) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа C_2H_6 " = "не превышена" = дальнейшая эксплуатация
- 9) параметр концентрация газа $> 0,005$
- 10) вывод: "предельно-допустимая концентрация газа C_2H_6 " = "превышена" = необходимо увеличить число диагностических измерений для определения динамики развития газосодержания этана C_2H_6
- 11) вывод: "не приводит к увеличению концентрации C_2H_6 " = "снизить количество замеров, контролировать" = дальнейшая эксплуатация
- 12) вывод: "приводит к увеличению концентрации C_2H_6 " = "ремонт = время цикла на ремонт – **8 часов**
- 13) характерные дефекты: нагрев контакта внутри обмотки; нагрев масла; неисправность системы охлаждения

Как видно, правила достаточно легко формулируются на естественном языке, который уже приближен для ввода в экспертную систему. Каждое последующее правило формализуется и хранится в базе знаний экспертного регулятора.

На основании выше изложенного материала мы имеем стандартное развитие дефектов в преобразовательном трансформаторе, то есть чёткий вывод. Как правило, аварии в преобразовательных трансформаторах развиваются по нескольким направлениям или комбинированно, в этом случае чёткое решение о харак-

терном дефекте затруднительно. Поэтому подобные дефекты должны храниться в базе знаний и в случае их повторения выдаваться в решения уже как чёткий вывод.

3.2 Принципы формирования правил нечёткого вывода для экспертного регулятора по результатам диагностики развивающихся дефектов в преобразовательном трансформаторе

Опыт эксплуатации и устранения дефектов на преобразовательном трансформаторе показывает, что нечёткий вывод может быть получен при одновременном сочетании превышений концентраций различных растворённых газов одновременно, например – H_2 и C_2H_2 ; CH_4 и CO_2 . Ниже приведены структурные схемы для таких сочетаний.

3.2.1 Структурная схема для анализа концентраций водорода (H_2) и ацетилена (C_2H_2)

При появлении одновременно двух характерных газов H_2 и C_2H_2 , вывод о возникшем дефекте чётко сформулировать не представляется возможным. Экспертный регулятор формирует нечёткий вывод. Затем экспертами решается задача по определению причин возникновения такого дефекта [69].

На основании нечёткого вывода мы вводим правило, дающее ответ на вопрос - при сочетании превышений газов H_2 и C_2H_2 на рисунке 15, какой предполагаемый дефект может быть и каково время цикла на его устранение.

Правило 8:

- 1) тип трансформатора = ТДЦНП-50000/10
- 2) параметр "название газа" H_2
- 3) параметр "название газа" C_2H_2

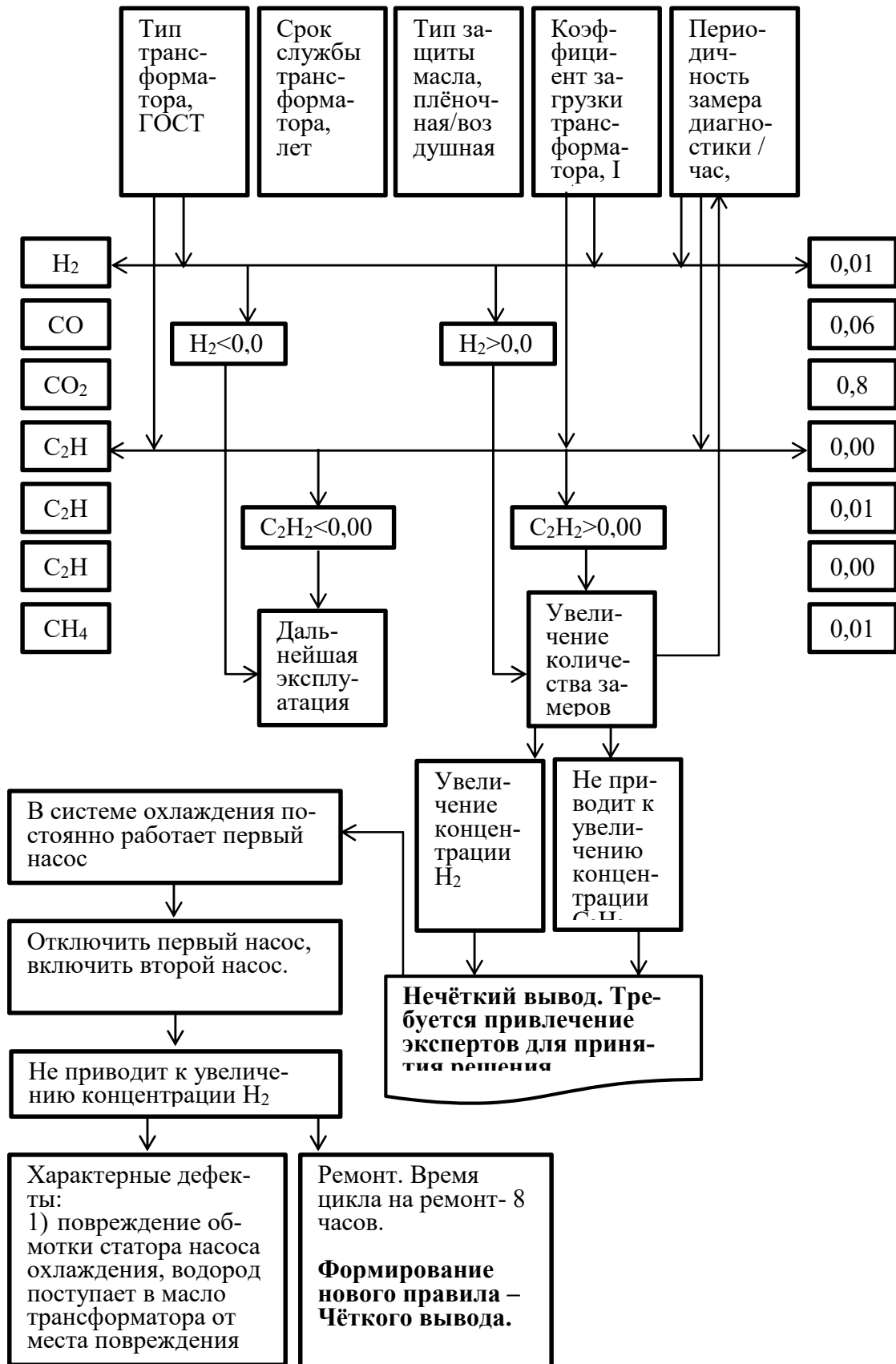


Рисунок 15 – Структурная схема для анализа концентраций водорода H_2 и ацетилена C_2H_2

- 4) параметр "срок службы"
- 5) тип защиты масла = плёночная/воздушная
- 6) коэффициент загрузки = сила тока рабочего, кА
- 7) количество диагностических замеров
- 8) параметр "концентрация газов" $H_2 < 0,01$ и $C_2H_2 < 0,001$
- 9) вывод: "предельно-допустимая концентрация газов" = "не превышена" = дальнейшая эксплуатация
- 10) параметр "концентрация газов" $H_2 > 0,01$ и $C_2H_2 > 0,001$
- 11) вывод: "предельно-допустимая концентрация газов H_2 и C_2H_2 " = "превышена" = необходимо увеличить число диагностических измерений для определения динамики развития газосодержания H_2 и C_2H_2
- 12) вывод: "не приводит к увеличению концентрации C_2H_2 " и "приводит к увеличению концентрации H_2 " = "**нечёткий вывод**" = требуется привлечение экспертов для принятия решения
- 13) параметр "в системе охлаждения постоянно работает первый насос" = вывод: "отключить первый насос, включить второй насос" = вывод: "не приводит к увеличению концентрации H_2 " = время цикла на ремонт – **8 часов**
- 14) характерные дефекты: повреждение обмотки статора насоса охлаждения, водород поступает в масло трансформатора от места повреждения обмотки статора
- 15) Формирование нового правила – **Чёткого вывода** – и занесение этого правила в базу знаний экспертного регулятора

3.2.2 Структурная схема для анализа концентраций метана (CH_4) и диоксида углерода (CO_2)

На основании нечёткого вывода мы вводим правило, дающее ответ на вопрос - при сочетании превышений газов CH_4 и CO_2 на рисунке 16, какой предполагаемый дефект может быть и каково время цикла на его устранение. Тогда нам необходимо сформулировать элементы этого правила:

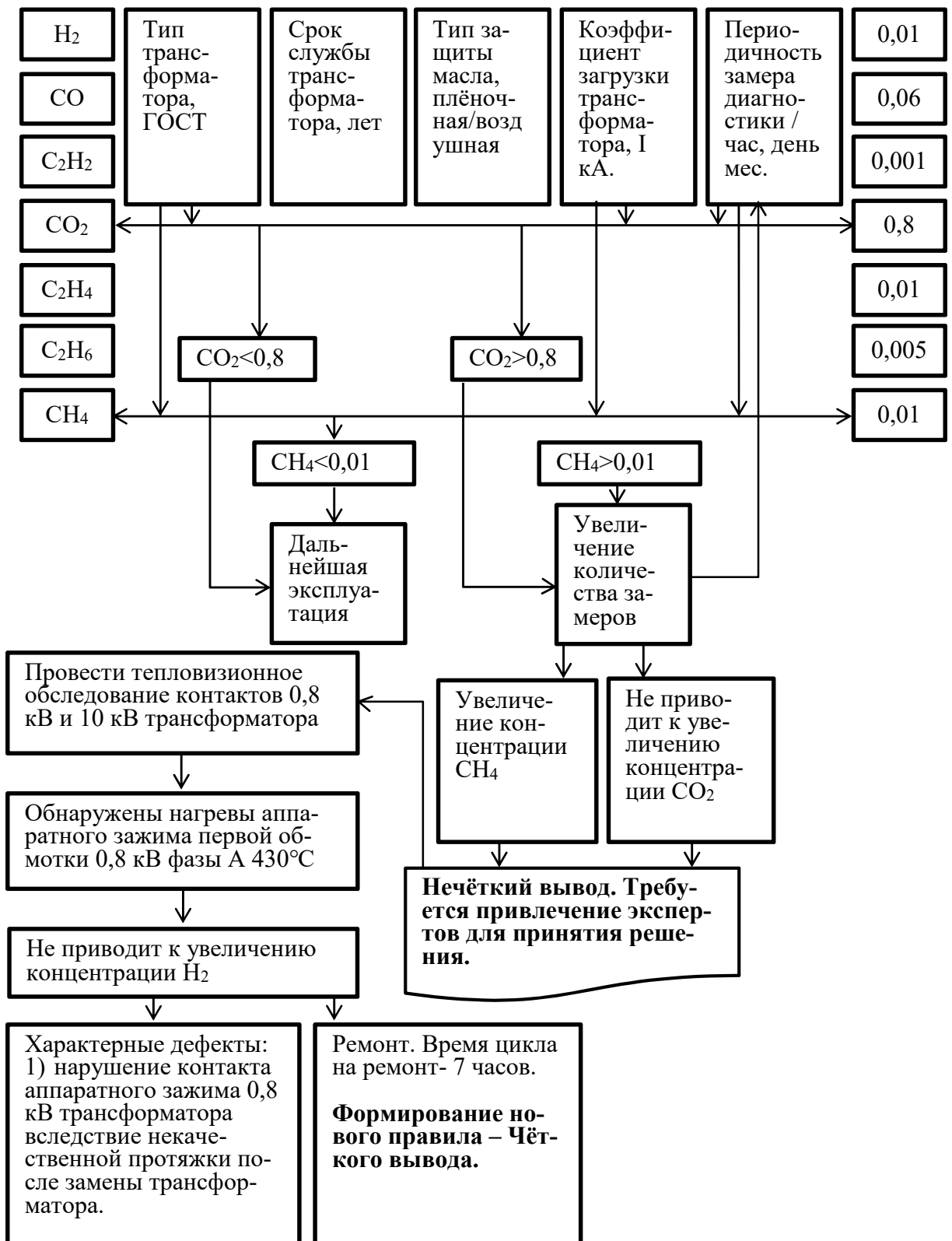


Рисунок 16 – Структурная схема для анализа концентраций CH₄ и CO₂

Правило 9:

- 1) тип трансформатора = ТДЦНП-50000/10
- 2) параметр "название газа" CH_4
- 3) параметр "название газа" CO_2
- 4) параметр "срок службы"
- 5) тип защиты масла = плёночная/воздушная
- 6) коэффициент загрузки = сила тока рабочего, кА
- 7) количество диагностических замеров
- 8) параметр "концентрация газов" $\text{CH}_4 < 0,01$ и $\text{CO}_2 < 0,8$
- 9) вывод: "предельно-допустимая концентрация газов" = "не превышена" = дальнейшая эксплуатация
- 10) параметр "концентрация газов" $\text{CH}_4 > 0,01$ и $\text{CO}_2 > 0,8$
- 11) вывод: "предельно-допустимая концентрация газов H_2 и C_2H_2 " = "превышена" = необходимо увеличить число диагностических измерений для определения динамики развития газосодержания CH_4 и CO_2
- 12) вывод: "не приводит к увеличению концентрации CO_2 " и "приводит к увеличению концентрации CH_4 " = "**нечёткий вывод**" = требуется привлечение экспертов для принятия решения
- 13) параметр "провести тепловизионное обследование контактных соединений трансформатора по стороне 0,8 кВ и по 10 кВ" = вывод: "обнаружен нагрев контактного соединения первой обмотки 0,8 кВ фазы А, температура нагрева 430°C " = вывод: время цикла на ремонт – **7 часов**
- 14) характерные дефекты: нарушение контакта аппаратного зажима 0,8 кВ трансформатора вследствие некачественной протяжки после замены трансформатора
- 15) Формирование нового правила – **чёткого вывода** – и занесение этого правила в базу знаний экспертного регулятора

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 качественного чёткого вывода [70]. На основании данных принципов был применён алгоритм самообучения и сформирован экспертный регулятор в системе телемеханики КПП ЦЭО ПАО «РУСАЛ Братск». Ниже представлены диаграммы экспертного регулятора системы телемеханики (рисунки 17,18,19,20).

Как видно из представленных диаграмм (рисунки 17,18,19,20), экспертный регулятор с принципами самообучения и сохранением базы знаний может применяться в системах управления и диагностики электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности.

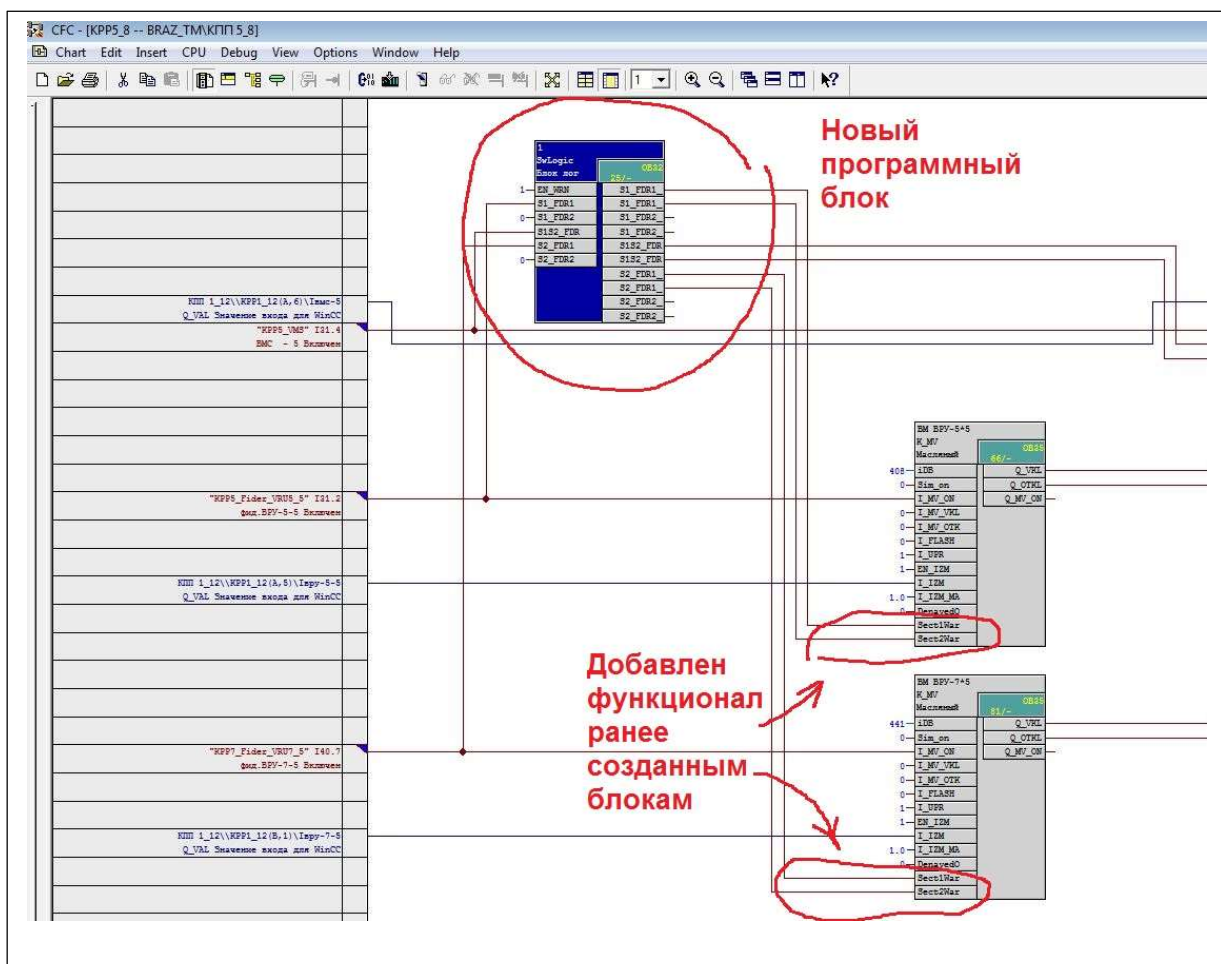


Рисунок 17 – Экспертный регулятор – новый программный блок

```

SCL - [SwLogic -- BRAZ_TM\TM_AS01\CPU 416-2 DP]
File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help
[Icons]
[Icons]
S2_FDR1_S1WRN {S7_visible:='true'; S7_m_c:='false' } :BOOL; //Секц.2 Фид.1 Откл. питания секц.1
S2_FDR1_S2WRN {S7_visible:='true'; S7_m_c:='false' } :BOOL; //Секц.2 Фид.1 Откл. питания секц.2

S2_FDR2_S1WRN {S7_visible:='true'; S7_m_c:='false' } :BOOL; //Секц.2 Фид.2 Откл. питания секц.1
S2_FDR2_S2WRN {S7_visible:='true'; S7_m_c:='false' } :BOOL; //Секц.2 Фид.2 Откл. питания секц.2
END_VAR

VAR_IN_OUT
END_VAR

VAR_TEMP
S1_PWR :BOOL; //Наличие питания секции 1 от своих вводов
S2_PWR :BOOL; //Наличие питания секции 2 от своих вводов
S1_PWR_BY_S2 :BOOL; //Наличие питания секции 1 от секции 2
S2_PWR_BY_S1 :BOOL; //Наличие питания секции 2 от секции 1
END_VAR

//*****
// Раздел кода
//*****
//Питание секций от своих вводов:
S1_PWR := S1_FDR1 OR S1_FDR2;
S2_PWR := S2_FDR1 OR S2_FDR2;
//Питание одной секции от другой:
S1_PWR_BY_S2 := S2_PWR AND S1S2_FDR;
S2_PWR_BY_S1 := S1_PWR AND S1S2_FDR;

//Предупреждения о возможности обесточивания своей секции при отключении ввода:
S1_FDR1_S1WRN := S1_FDR1 AND NOT S1_FDR2 AND NOT S1_PWR_BY_S2;
S1_FDR2_S1WRN := S1_FDR2 AND NOT S1_FDR1 AND NOT S1_PWR_BY_S2;
S2_FDR1_S2WRN := S2_FDR1 AND NOT S2_FDR2 AND NOT S2_PWR_BY_S1;
S2_FDR2_S2WRN := S2_FDR2 AND NOT S2_FDR1 AND NOT S2_PWR_BY_S1;

//Предупреждения о возможности обесточивания противоположной секции при отключении ввода:
S1_FDR1_S2WRN := S1_FDR1 AND NOT S1_FDR2 AND S1S2_FDR AND NOT S2_PWR;
S1_FDR2_S2WRN := S1_FDR2 AND NOT S1_FDR1 AND S1S2_FDR AND NOT S2_PWR;
S2_FDR1_S1WRN := S2_FDR1 AND NOT S2_FDR2 AND S1S2_FDR AND NOT S1_PWR;
S2_FDR2_S1WRN := S2_FDR2 AND NOT S2_FDR1 AND S1S2_FDR AND NOT S1_PWR;

//Предупреждения при отключении межсекционного выключателя
S1S2_FDR_S1WRN := S1S2_FDR AND NOT S1_PWR AND S2_PWR;
S1S2_FDR_S2WRN := S1S2_FDR AND NOT S2_PWR AND S1_PWR;

IF (NOT EN_WRN) THEN
  // Statement Section_IF
  S1_FDR1_S1WRN := FALSE;
  S1_FDR1_S2WRN := FALSE;
  S1_FDR2_S1WRN := FALSE;
  S1_FDR2_S2WRN := FALSE;

```

Рисунок 18 – Экспертный регулятор - логика переключений

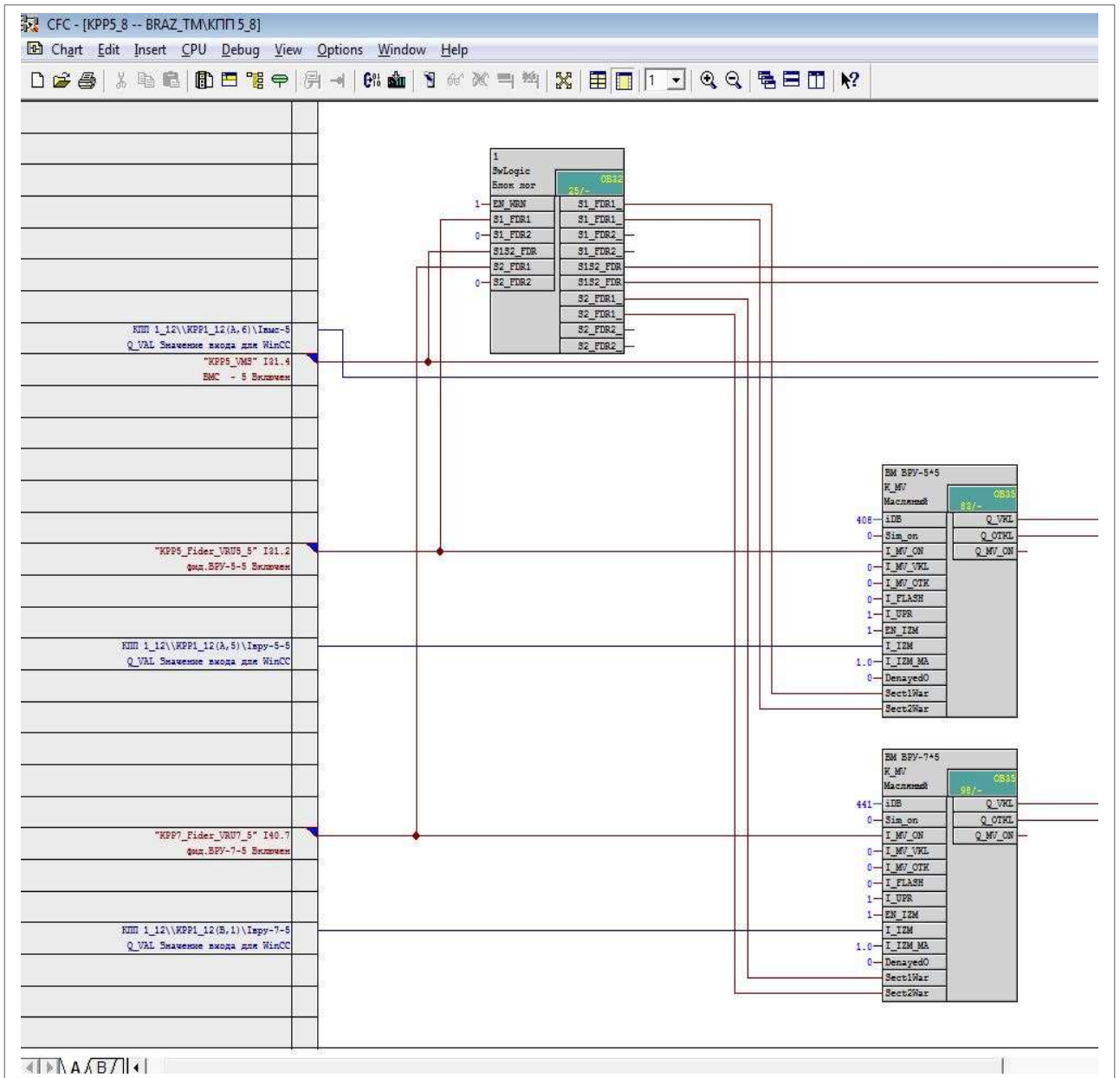


Рисунок 19 – Экспертный регулятор - функциональная схема

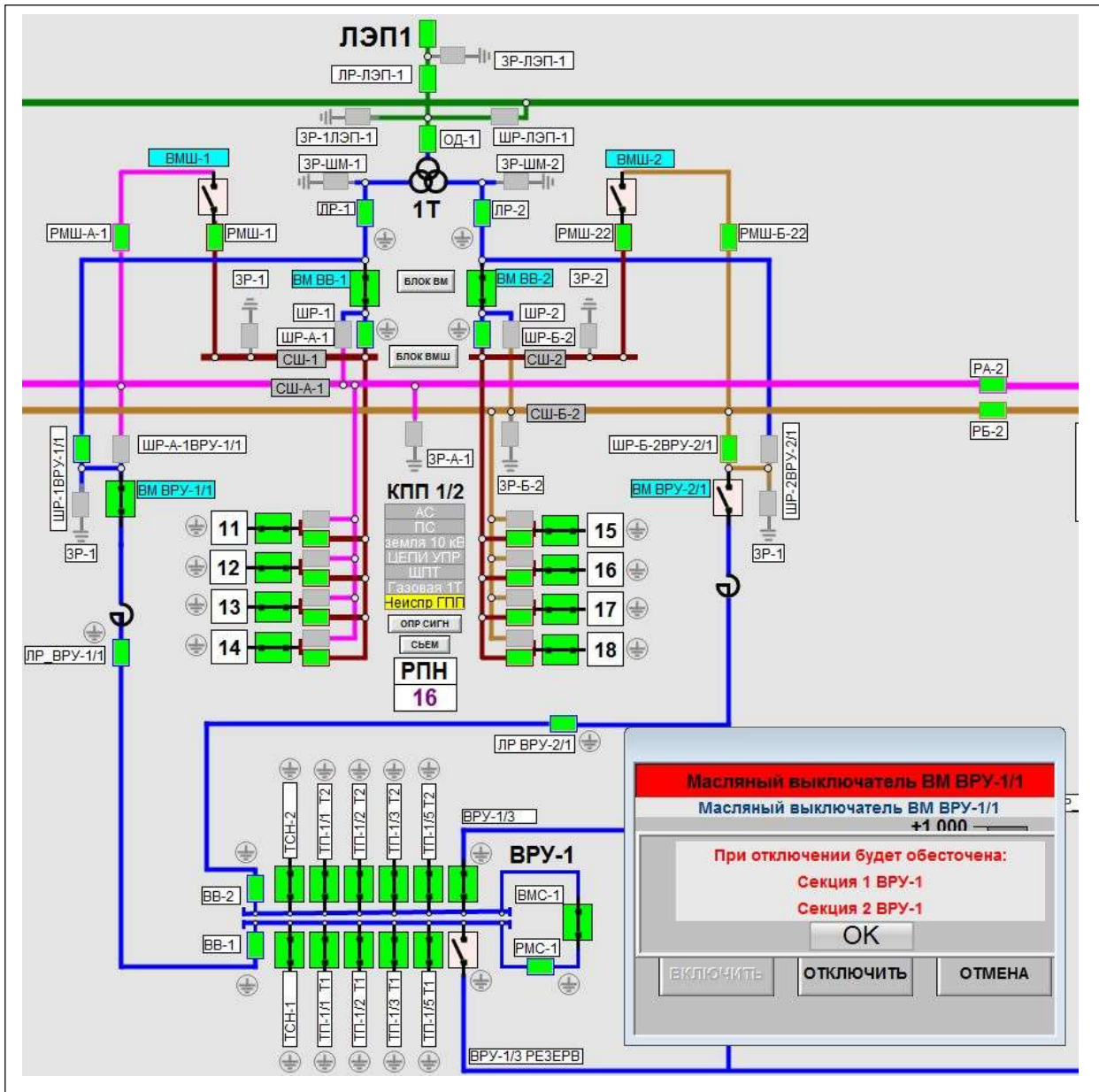


Рисунок 20 – Экспертный регулятор - функциональная схема

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 определённость производственного процесса [71]. Она определяется временем такта на выполнение конкретной работы. Время такта – это время, отведённое на выполнение ремонтных работ. Оно форми-

руется исходя из технологических особенностей предприятий алюминиевой промышленности и связано напрямую с загрузкой основных мощностей предприятия. На рисунке 21 приведена диаграмма, показывающая отличительные особенности времени такта и времени цикла.

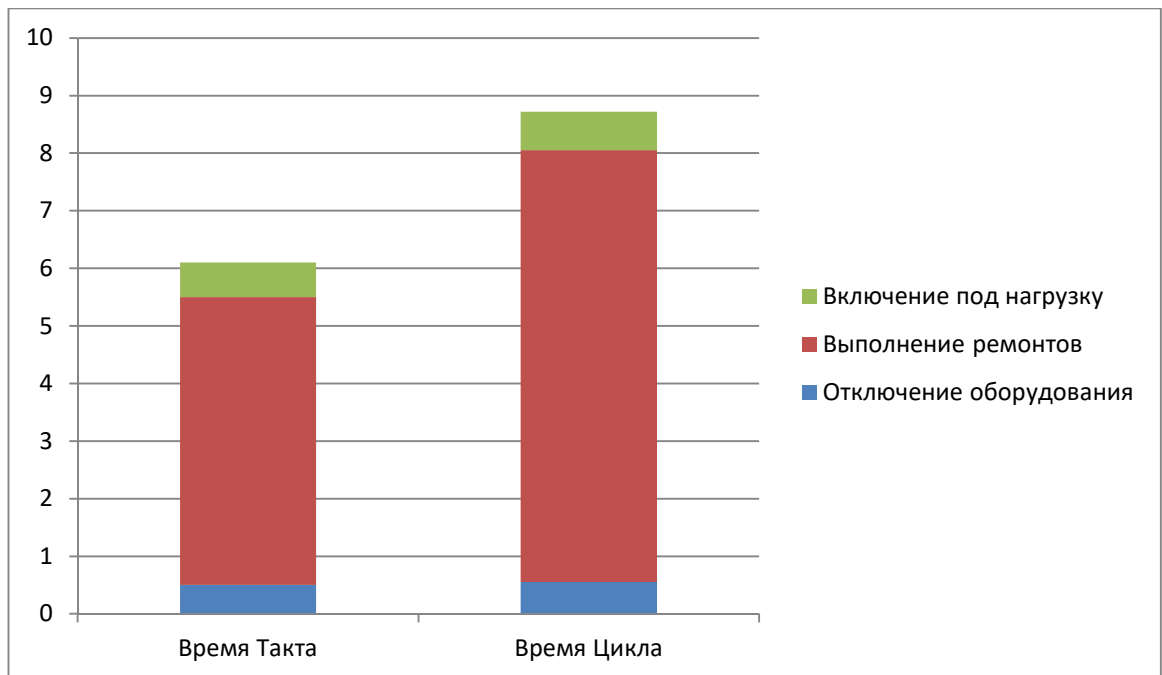


Рисунок 21 – Диаграмма отличительных особенностей времени Такта и времени Цикла

Как видно из диаграмм, 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.

3.3 Выводы по третьей главе

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 с 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 будет распознаваться как чёткий вывод.

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

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

4. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ РЕМОНТОВ «КАНБАН» К УСЛОВИЯМ РЕМОНТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Сущность этого метода заключается в децентрализации управления, в так называемом «вытягивании ресурсов». На основании заключения экспертной системы диагностики определяется необходимость того или иного ремонта и рассчитывается время на выполнение ремонтов. В методе КАНБАН предполагается, что продукт производства – это время ремонта единицы оборудования, передаётся от одних исполнителей другим. Работа определяется временем такта, которое изначально задаётся экспертной системой диагностики электрооборудования. В системе ремонтов задействовано много подразделений, и согласованность их действий централизуется порядком и правилами выполнения определённых задач, которые также мы получаем от экспертной системы диагностики.

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. Например, фильтрацию трансформаторного масла, чистку контактов, ремонт обмотки трансформатора можно проводить независимо, в этом и заключается понятие «вытягивание ресурсов», то есть в один отрезок времени можно выполнить k – параллельных операций заключения и получить результат, который сократит время ремонта. На основании заключения экспертной си-

системы диагностики определяется необходимость того или иного ремонта и рассчитывается время на выполнение ремонтов с учётом параллельности выполнения работ. В методе КАНБАН предполагается, что продукт производства – это время ремонта единицы оборудования - передаётся от одних исполнителей другим не только по последовательной схеме, но, в первую очередь, по параллельным ветвям [72]. Работа определяется временем такта, которое изначально задается экспертной системой диагностики электрооборудования, в первую очередь, для параллельных ветвей, а в последующем для последовательности ремонта.

В системе ремонтов задействовано много подразделений, и согласованность их действий централизуется порядком и правилами выполнения определённых задач, которые так же мы получаем от экспертной системы диагностики. Экспертный регулятор системы диагностики выдаёт нам не только нечёткие решения той или иной задачи, но сформулированные в виде производственной последовательности выполнения задачи ремонтов оборудования. Причём если на выходе таблицы нечёткой логики мы получаем возможные варианты решений в виде строк вариантов таблицы, то каждому значению её решения соответствует определённый порядок (граф) выполнения задачи, определяющий её чёткое время такта. Время такта, получаемое на выходе системы необходимо для его управления. Это очень важный показатель в ремонтах высоковольтного оборудования, поскольку от времени постоянной работы данного оборудования зависит бесперебойное обеспечение электрической энергией всех потребителей. Вторым по значимости показателем нужности знания времени такта является повышение производительности работы оборудования.

Рассмотрели повышение производительности работы оборудования на примере высоковольтной подстанции ПАО «РУСАЛ Братск». Данная подстанция получает электрическую энергию по стороне 10 кВ от главной подстанции. Далее в ней происходит трансформация напряжения 10 кВ до уровня 850 В и преобразование переменного тока в выпрямленный ток по 12 и 24- пульсной схеме выпрямления. Регулирование уровнем напряжения производится с помощью устройств РПН по стороне 10 кВ

трансформаторов и на стороне 850 В при помощи дросселей насыщения путём насыщения его сердечника и обмоток током управления. На подстанции постоянно работают восемь агрегатов (разъединители + выключатель + трансформатор+дроссель+выпрямительный блок + разъединитель). Ремонтная схема выпрямления осуществляется по типу N+1. То есть на семи агрегатах поддерживается необходимый уровень задания тока [73]. Причём если постоянно работать на восьми агрегатах, то задание тока можно увеличить и получить дополнительную продукцию, которая и определит повышение производительности производства.

Поэтому чем меньше времени потребуются на ремонт оборудования, тем больше времени придётся на работу с высокой производительностью. Следовательно, зная время такта системы, мы можем предположить, что при оптимальном управлении ремонтами мы выполним задание, расставив производственные подразделения в централизованную очередность выполнения заданий, а система будет работать децентрализованно путём передачи выполнения времени ремонта от одного к другому, в первую очередь по параллельным схемам ремонта, сокращая количество подразделений в каждой параллельной схеме. Для каждой параллельной ветви в схеме ремонта первое подразделение, получив временное задание – выполнить ремонт за определённый отрезок времени, выполняет его и передаёт карточку КАНБАН второму подразделению.

Второе подразделение, выполнив свою часть задания, передаёт карточку КАНБАН третьему подразделению. При чём если третье подразделение в своём боксе КАНБАНОВ не получило выполненное задание второго подразделения, то оно выдаёт задание второму подразделению в виде карточки КАНБАНА в первостепенной важности бокса КАНБАНОВ и так далее один за другим. Таким образом, каждое подразделение работает от КАНБАНА до КАНБАНА, постоянно ждёт выполнение КАНБАНА предыдущего подразделения и одновременно является поставщиком услуг для последующего подразделения. Являясь заказчиком одного подразделения, оно служит исполнителем для другого подразделения. Система КАНБАН нацелена на

сокращение общего времени ремонта оборудования за счёт использования параллельных схем ремонта и по возможности увеличения их количества.

Система позволяет наглядно выстроить диаграмму выполнения заданий каждого подразделения. Для её построения требуется провести хронометраж времени выполнения задания каждым подразделением, но в строгой централизации и по возможности наибольшей разбивке каждого задания. Таким образом, получается некий граф заданий. Для начала проводится наблюдение за процессом выполнения, учитываются все мелочи, все переходы операторов или оператора.

Вообще в идеале 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, сокращается время потерь на ремонт отдельных операций. Точность метода будет определяться разбивкой каждой крупной операции на k мелких операций, так как в более мелкой операции проще найти время потерь при ремонтах. А для каждой операции необходимо определить максимальное и минимальное время её выполнения для установления причин отличия между максимальным и минимальным временем её выполнения и в дальнейшем учесть это в организации ремонтных работ. Например, систематизировать систему хранения и выдачи комплектующих по виду ремонта, а не по номенклатуре. Следовательно, в каждом задании будут как меньшие, так и большие значения. Они построчно записываются в столбцы выполнения максимального и минимального времени. 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 цикла) превышает время такта (T такта):

$$T \text{ цикла} > T \text{ такта} \quad (5)$$

то, рассчитывается скорректированное время выполнения задания T корректиров:

$$T \text{ корректир} = T \text{ цикла} - T \text{ такта} \quad (6)$$

На диаграмме, представленной на рисунке 22, определяются наиболее затратные по времени позиции задания, и их время корректируется.

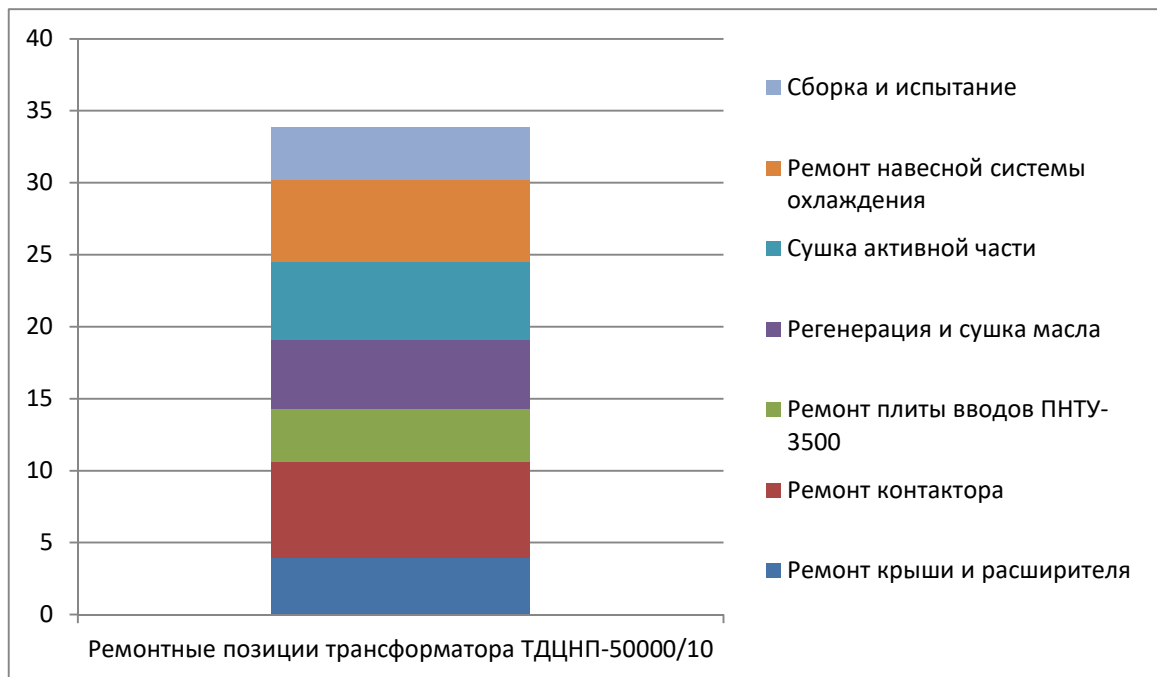


Рисунок 22 – Диаграмма времени Цикла ремонтных работ

Таким образом, всё задание приводится к времени такта. Далее разбирается каждый оператор задания аналогичным способом и выстраивается диаграмма стандартизированной работы [74]. На ней вырисовываются все операторы и отмечается время такта. Каждому оператору определяется время стандартизированной работы, время его цикла и время переходов. Пример параллельных ветвей при ремонте трансформатора представлен на рисунке 23.

Если время цикла оператора превышает время такта графа заданий, то выполняются корректирующие действия операторов. Это может быть разработка КАЙЗЕНОВ для отдельного оператора.

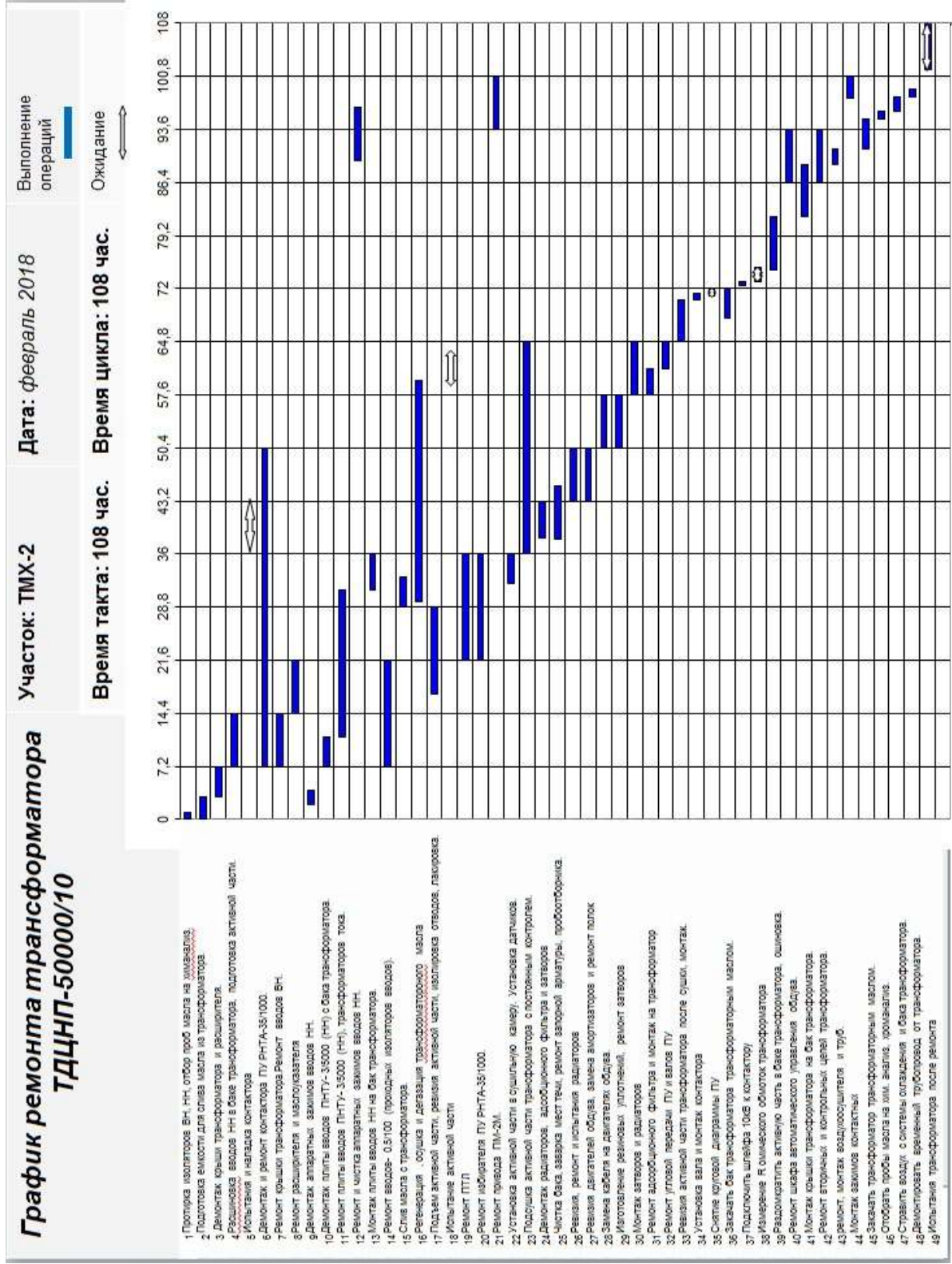


Рисунок 23 – Диаграмма времени Цикла ремонтных работ трансформатора ТДЦНП-50000/10

Из диаграммы, представленной на рисунке 24, видно, что при последовательном выполнении операций по ремонту трансформатора ТДЦНП-50000/10 время цикла составляет 220 часов, что соответствует 30 дням ремонта. Такое время цикла не устраивает технологический ритм предприятий алюминиевой промышленности, так как время такта на ремонт составляет 108 часов. Поэтому проводятся работы по запараллеливанию последовательных процессов ремонтных работ, чтобы привести общий цикл ремонта к требуемому времени такта 108 часов. Как уже говорилось выше, данная диаграмма представлена на рисунке 23.

На рисунке 25 представлена диаграмма выполнения ремонтных работ операторами ремонта при последовательном выполнении работ.

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. То есть КАНБАН необходимо использовать для сокращения времени операции каждой параллельной ветви. При этом весь цикл ремонта необходимо разбивать на максимальное количество параллельных ветвей, то есть для отдельного вида работ необходимо принятие решения о разбивке данной единицы задания на два параллельных оператора. В любом случае время цикла задания не должно превышать время такта задания. В противном случае сохраняется риск невыполнения задания, что приведёт к простоям в ремонте оборудования. На диаграмме (рисунок 25) также видно, что оператор 1 и 2 выполняют своё задание намного меньше, чем время такта, то есть их время цикла меньше основного времени такта более чем в два раза, в то же время они выполняют операции последовательно.

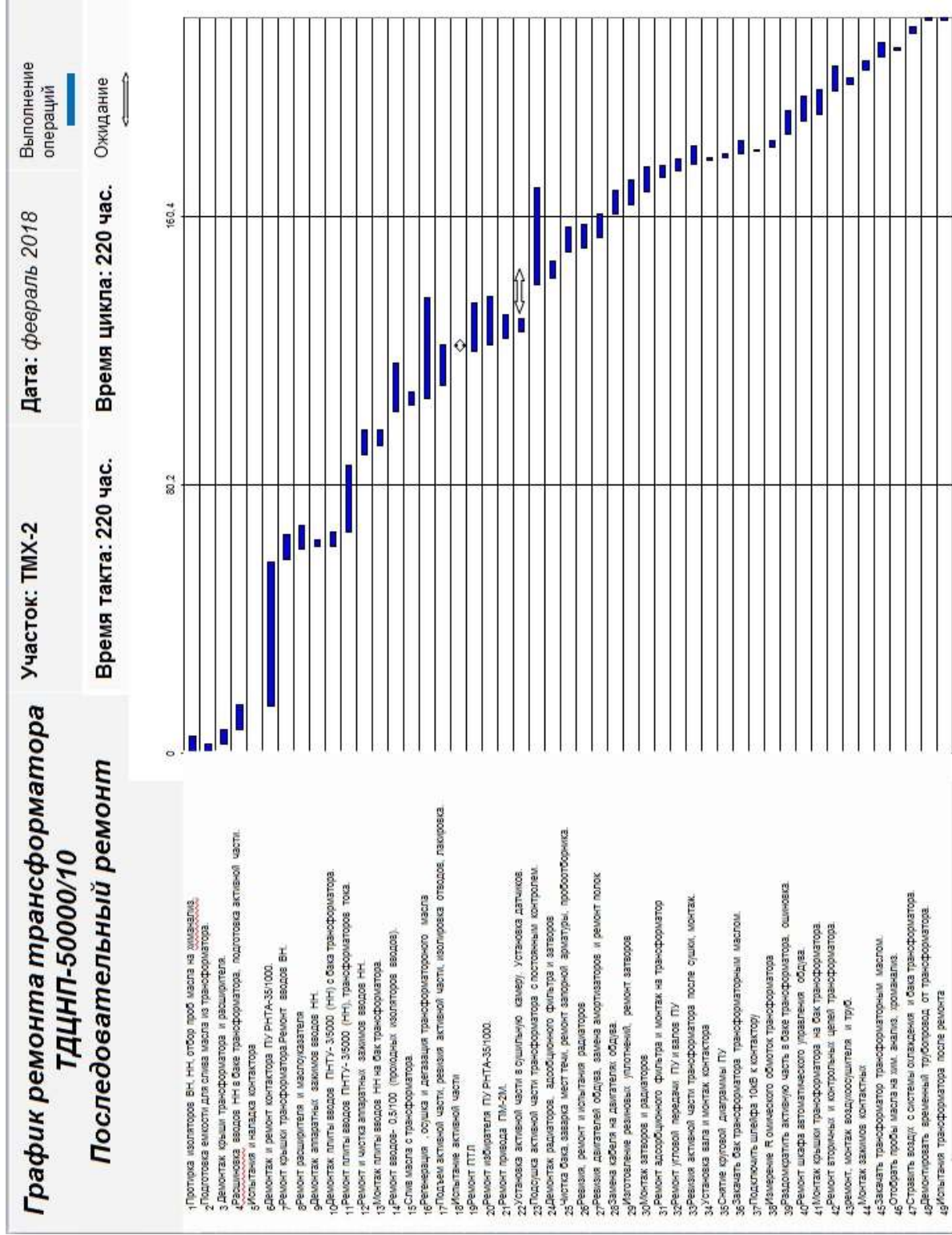


Рисунок 24 – Диаграмма времени Цикла ремонтных работ трансформатора ТДЦНП-50000/10 при последовательном выполнении операций

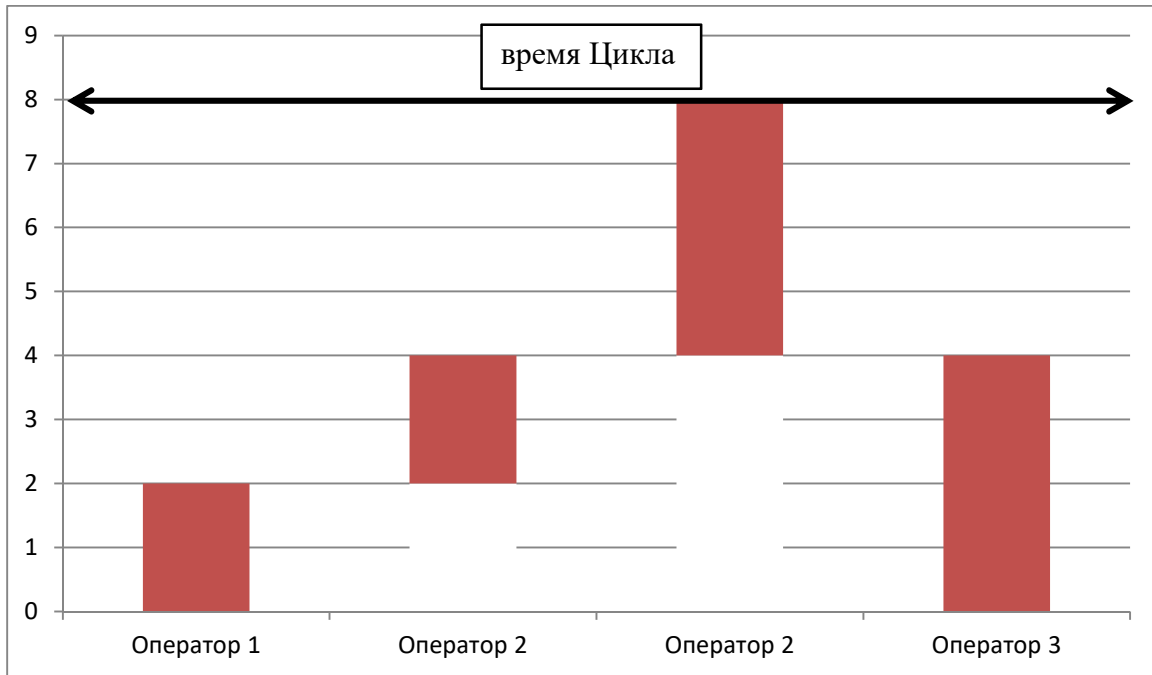


Рисунок 25 – Диаграмма времени выполнения последовательных работ операторами ремонта

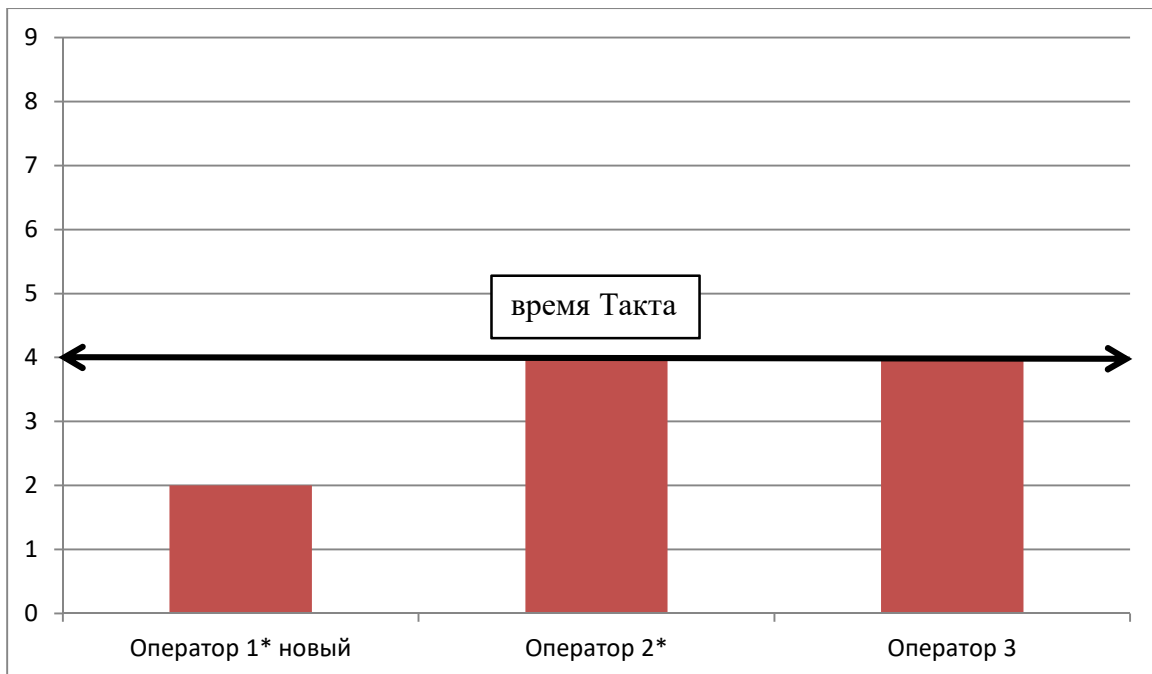


Рисунок 26 – Диаграмма времени выполнения параллельных работ операторами ремонта

Отсюда можно сделать вывод о повышении производительности этих двух операций более чем в два раза при их параллельной работе, рисунок 26. Для выполнения этой цели потребуется провести обучение первого оператора навыкам и специальности работы второго оператора и, не превышая общее время нового цикла совмещённого первого и второго оператора относительно общего времени такта, выполнить заданную работу с высокой производительностью.

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 (7)

$$N = (\max \{1, [-\ln(1 - P_l) / \ln F - 1]\}) * k \quad (7)$$

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 выполнения ремонтов при отключенном оборудовании необходимо выполнять 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 использовать его диапазон.

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

$$y[t + 1] = y[t] + x[t] - q[t] \quad (8)$$

где x и q – фактическое производство и спрос на КАЙЗЕНЫ. Если время цикла превышает время такта, то необходимо, как сказано выше, разбить общий процесс ремонта на необходимое количество параллельных процессов и проанализировать время их выполнения, определяя разницу между максимальным и минимальным временем вы-

полнения отдельных операций, определить 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 и передвижные тележки и верстаки,- тем самым сократив время цикла, необходимое для использования времени максимальных нагрузок. При этом его отклонение $x[t]$ будет выражено:

$$x[t] = \begin{cases} 0, y[t] \geq N \text{ или } E[t] = 0; \\ 1, y[t] < N \text{ или } E[t] = 1, \end{cases} \quad (9)$$

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

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

$$I_2(N) = \sum_{y=1}^N p(y) = N - \frac{1}{F-1} + \frac{1}{(F-1)\{F^N\}} \quad (10)$$

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:

$$I_1(N) = \sum_{y=-\infty}^{-1} P(y) = \frac{1}{(F-1)\{F^{N+1}\}} \quad (11)$$

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

В этом случае система управления может работать самостоятельно с периодическим контролем. Операторам системы потребуются 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. При этом снижение силы тока на оставшихся агрегатах (преобразовательных трансформаторах и выпрямительных блоках) будет минимальными или практически не изменится, следовательно, производительность не изменится или останется на прежнем уровне. Таким образом, использование часов максимума нагрузки позволяет минимизировать финансовые затраты на выполнение ремонтов электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности.

4.1 Выводы по четвертой главе:

1. Чёткий вывод экспертной системы помогает рассчитать главный параметр изучаемой области знаний – время такта. На основании рассчитанного времени удастся выстроить рациональную систему оперативного управления КАНБАН ремонтами электрооборудования 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 заданий. Для сокращения времени отдельной параллельной ветви ремонтов необходимо определить максимально возможное количество улучшений для данной ветви и определить необходимое количество первостепенного расходного материала для выполнения ремонтов.

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

5. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСОВ МАКСИМУМА НАГРУЗКИ ДЛЯ РЕМОНТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАТОРОВ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

5.1 Структура затрат по предприятиям алюминиевой промышленности

В основе электролитического производства алюминия лежит электролиз криолитоглиноземного расплава, основными компонентами которого являются криолит (Na_3AlF_6), фтористый алюминий (AlF_3), глинозем (Al_2O_3) и электроэнергия [75]. Процесс электролиза относится к экзотермической реакции, происходящей с большим выделением температуры 960°C , поэтому для её протекания необходима большая величина электричества, соответствующая энергии Гиббса – 967 кДж. На рисунке 27 приведена структура затрат предприятия алюминиевой промышленности:

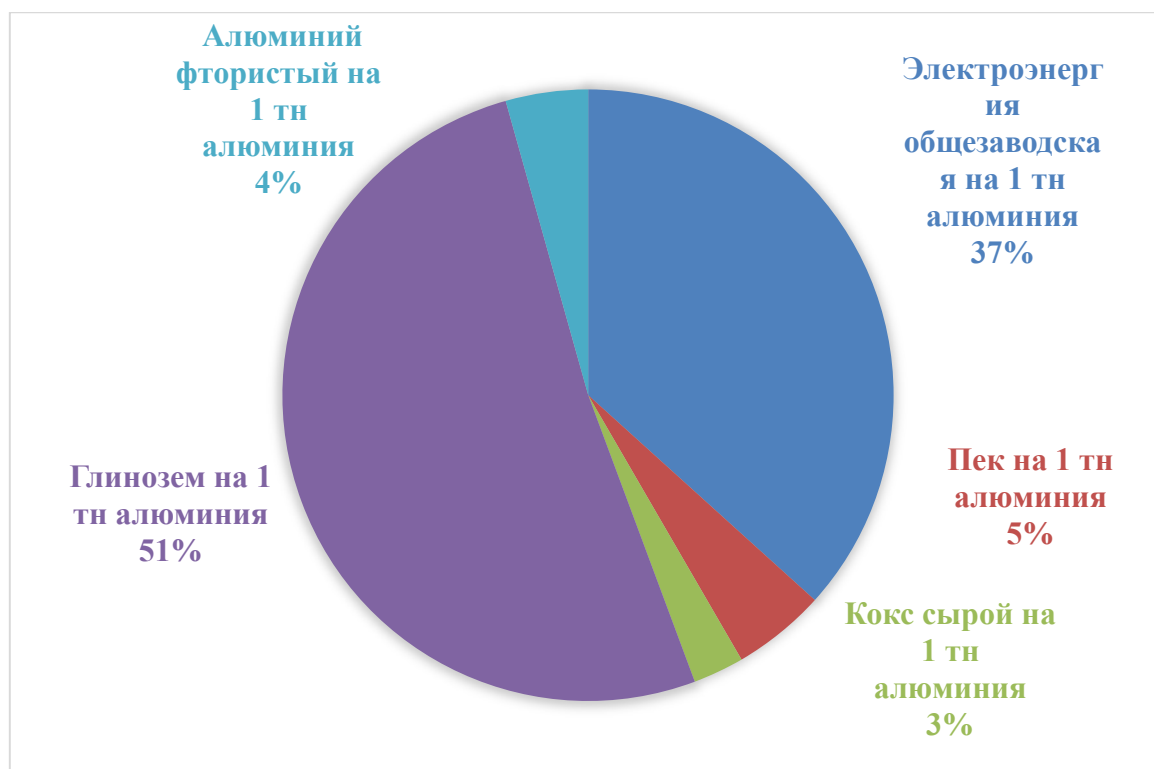


Рисунок 27 – Структура затрат алюминиевого предприятия

Как видно из диаграммы, представленной на рисунке 27, 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, а также повышения конкурентоспособности.

5.2 Анализ методов снижения электроэнергии на тонну выпускаемой продукции

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

1) Использование собственной генерации, в первую очередь связанной с восстановлением природных ресурсов – гидрогенерацией, которая многократно ниже по себестоимости выработку электроэнергии, чем на теплоэлектроцентралях – 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. Данные аспекты рассмотрены в следующих источниках [76].

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.

5.3 Оценка эффективности внедрения модуляции

Снижение нагрузки можно достичь за счёт снижения силы тока электролиза (модуляции) или за счёт отключения отдельных электроприёмников. Одним из необходимых способов является вывод преобразовательных трансформаторов в ремонт. Отсюда можно сделать вывод, что ремонты должны проводиться в часы максимума нагрузки либо при их максимальном использовании. Факторный анализ зависимости выпуска алюминия от мощности при модуляции силы тока представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Факторный анализ выпуска алюминия от мощности за сутки при модуляции силы тока (ГВт/тонн)

Часы в сутках	Мощность, ГВт	Выпуск алюминия(без модуляции), тонн	Мощность, ГВт	Выпуск алюминия(при модуляции), тонн
1	1,9	112	1,91	117
2	1,9	112	1,91	117
3	1,9	112	1,91	117
4	1,9	112	1,91	117
5	1,9	112	1,91	117
6	1,9	112	1,91	117
7	1,9	112	1,91	117
8	1,9	112	1,91	118
9	1,9	112	1,89	106
10	1,9	112	1,89	106
11	1,9	112	1,89	106
12	1,9	112	1,89	106
13	1,9	112	1,89	106
14	1,9	112	1,89	106
15	1,9	112	1,91	117
16	1,9	112	1,91	117
17	1,9	112	1,91	117
18	1,9	112	1,91	117
19	1,9	112	1,89	106
20	1,9	112	1,89	106
21	1,9	112	1,89	106
22	1,9	112	1,89	106
23	1,9	112	1,89	106
24	1,9	112	1,91	117
Итого		2688	-0,01	2688

Как видно из таблицы 5, в результате проводимой модуляции выпуск алюминия за сутки не изменился. Процесс электролитического получения алюминия происходит с затратой большого количества электрической энергии. На производство 1 тонны 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 расчёте 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 $1910 \text{ МВт} \cdot 210 \text{ тыс.руб.} = 401,1 \text{ млн.руб.}$ в месяц. Таким образом, суммарная годовая оплата за электроэнергию составит: $(1,9 \text{ млрд.руб.} + 0,4011 \text{ млрд.руб.}) \cdot 12 = 27\,613\,200\,000 \text{ руб.}$ Определённое целевое значение регулирования 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 принесёт снижение оплаты за электроэнергию в сумме $10 \text{ МВт} \cdot 210 \text{ тыс.руб.} = 2,1 \text{ млн.руб.}$

При эксплуатации электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности возникают аварийные ситуации, в которых сложно сформулировать чёткий вывод, и, как сказано в главе 3, они переходят в нечёткий вывод. Затем при самообучении экспертного регулятора формируется чёткий вывод. При возникновении аварийной ситуации, описанной в главе 3.2.1, 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, описанный в главе 3.2.2: 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. Факторный анализ [77] зависимости выпуска алюминия от мощности при выполнении ремонтов в часы максимума нагрузки представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Факторный анализ выпуска алюминия от мощности за сутки при выполнении ремонтов в часы максимума нагрузки (ГВт/тонн)

Часы в сутках	Мощность, ГВт	Выпуск алюминия(без модуляции), тонн	Мощность, ГВт	Выпуск алюминия(при модуляции), тонн
1	1,9	112	1,92	118
2	1,9	112	1,92	118
3	1,9	112	1,92	118
4	1,9	112	1,92	118
5	1,9	112	1,92	118
6	1,9	112	1,92	118
7	1,9	112	1,92	118
8	1,9	112	1,92	118
9	1,9	112	1,88	105
10	1,9	112	1,88	105
11	1,9	112	1,88	105
12	1,9	112	1,88	105
13	1,9	112	1,88	105
14	1,9	112	1,88	105
15	1,9	112	1,92	118
16	1,9	112	1,92	118
17	1,9	112	1,92	118
18	1,9	112	1,92	118
19	1,9	112	1,88	105
20	1,9	112	1,88	105
21	1,9	112	1,88	105
22	1,9	112	1,88	105
23	1,9	112	1,88	105
24	1,9	112	1,92	117
Итого		2688	-0,02	2688

Как видно из таблицы 6, в результате проводимой модуляции с одновременным выполнением ремонтов по системе КАНБАН (параллельным способом)

выпуск алюминия за сутки не изменился, а глубина модуляции стала больше и составила 20 МВт. То есть ежемесячная экономия в 20 МВт в месяц принесёт снижение оплаты за электроэнергию в сумме $20\text{МВт} \cdot 210\text{тыс.руб.} = 4,2\text{ млн.руб.}$

В таблице 7 представлен факторный анализ аварийной ситуации, описанный в главе 3.1.7, при замене масла трансформатора и времени цикла, равном 15 часам.

Таблица 7 – Факторный анализ выпуска алюминия от мощности за сутки при выполнении ремонтов обычным последовательным способом (ГВт/тонн)

Часы в сутках	Мощность, ГВт	Выпуск алюминия(без модуляции), тонн	Мощность, ГВт	Выпуск алюминия(при модуляции), тонн
1	1,9	112	1,92	118
2	1,9	112	1,92	118
3	1,9	112	1,92	118
4	1,9	112	1,92	118
5	1,9	112	1,92	118
6	1,9	112	1,92	118
7	1,9	112	1,92	118
8	1,9	112	1,88	105
9	1,9	112	1,88	105
10	1,9	112	1,88	105
11	1,9	112	1,88	105
12	1,9	112	1,88	105
13	1,9	112	1,88	105
14	1,9	112	1,88	105
15	1,9	112	1,88	105
16	1,9	112	1,88	105
17	1,9	112	1,88	105
18	1,9	112	1,88	105
19	1,9	112	1,88	105
20	1,9	112	1,88	105
21	1,9	112	1,88	105
22	1,9	112	1,88	105
23	1,9	112	1,92	118
24	1,9	112	1,92	118
Итого		2688	-0,02	2637

Как видно из таблицы 7, в результате проводимой модуляции с одновременным выполнением ремонтов по обычному последовательному способу плановый выпуск алюминия должен был составить 2688 тонны, а на самом деле выпуск алюминия за сутки снизился и составил 2637 тонны, что меньше на 51 тонну в сутки и соответственно за месяц меньше на: $51 \text{ тонна} \cdot 31 \text{ день} = 1581 \text{ тонна}$.

Глубина модуляции составила 20 МВт. То есть ежемесячная экономия от модуляции силы тока на электролиз алюминия составит – 20 МВт в месяц и принесёт снижение оплаты за электроэнергию в сумме: $20 \text{ МВт} \cdot 210 \text{ тыс. руб.} = 4,2 \text{ млн. руб.}$ Годовой недовыпуск алюминия в сумме: $51 \text{ тонна} \cdot 365 \cdot 1800 \$ \cdot 60 \text{ руб.} = 2\,010,420 \text{ млн. руб.}$, что при учёте модуляции в $4,2 \cdot 12 = 50,4 \text{ млн. руб.}$ понесёт убытки в 1 960,02 млн.руб., при чистой прибыли $2\,010,42 \cdot 11,22\% = 225,732 \text{ млн. руб.}$ Таким образом, выполнение ремонтов последовательным способом не приносит прибыли компаниям алюминиевой промышленности.

5.4 Факторный анализ ремонтных работ электрооборудования и трансформаторов алюминиевой промышленности

Факторный анализ выполнен на примере цеха электрообеспечения ЦЭО ПАО «РУСАЛ Братск». В нижеследующей таблице 9 приведено финансирование по основным статьям затрат, связанным с ремонтом по традиционной последовательной схеме.

Согласно данным, представленных в разделе 5.3, совмещение модуляции силы тока и проведение ремонтов в часы максимума нагрузки позволяют достичь экономии от общей стоимости электроэнергии в размере 1 %. Рассмотрим экономию электроэнергии на примере ЦЭО ПАО «РУСАЛ Братск». Ежегодная оплата в стоимости электроэнергии за 2018 год составила 27 613 200 000 руб., экономия в 1% составит 276 132 000 руб., что выше, чем весь годовой бюджет цеха по ремонту ЦЭО ПАО «РУСАЛ Братск». 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 [78].

Таблица 8 – Факторный анализ финансирования по основным статьям затрат на примере ЦЭО ПАО «РУСАЛ Братск»

Номер	Статья затрат	Ежемесячная сумма, руб.	Годовая сумма, руб.
1	Фонд оплаты труда рабочих и РСС	6 358 765	76 305 180
2	Товарно-материальные ценности	6 765 431	81 185 172
3	Отчисления в государственные органы	3 456 874	41 482 488
4	Амортизация основных фондов	1 234 532	14 814 384
5	Услуги промышленного характера	1 231 458	14 777 496
6	Средства индивидуальной защиты и прочее	256 743	3 080 916
	ИТОГО	19 303 803	231 645 636

5.5 Выводы по пятой главе

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

2. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин // Интернет Инжиниринг. – 2006. – 672 с.
2. Альбокринов, В.С. Перенапряжения и защита от них в электроустановках нефтяной промышленности / В.С. Альбокринов, В.Г. Гольдштейн, Ф.Х. Халилов // Самара: Самарский университет. – 1997. – 324с.
3. Абрамов, Г.А. Теоретические основы электрометаллургии алюминия / Г.А. Абрамов // М.: Metallurgizdat. – 1953. – 583 с.
4. Добаев, А.З. Использование методов математической статистики для анализа данных систем учета электроэнергии / А.З. Добаев // Материалы VI международной конференции «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки». – Владикавказ: Литера, 2014. – С. 37–41.
5. Остроух, А.В. Интеллектуальные системы: уч. пособие / А.В. Остроух // Красноярск: Научно-инновационный центр. – 2015. – 110 с.
6. Vogt, H. The analysis of the approach of anode effects at aluminium electrolyses / H. Vogt, G. Tonstad // II Aluminum. 1999. №12.
7. Power, D. J. Decision support systems / D. J. Power, R. Sharda, F. Burstein // John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
8. Пупков, А.Н. Двухконтурное управление линейными динамическими системами и настройка параметров типовых регуляторов с использованием непараметрической модели / А.Н. Пупков, Н.Ф. Телешева, Р.Ю. Царев, А.В. Чубаров, О.В. Шестернева // Проблемы управления. – Красноярск: ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», 2013. – 190 с.
9. Михеев, М.Ю. Методы анализа данных и их реализация в системах поддержки принятия решений: учебное пособие / М.Ю. Михеев, О.В. Прокофьев, Ю.И. Семочкина // Пенза: Издательский дом ПГУ, 2014. – 118 с.
10. Katich, V. Modernization of pot lines in the city Shebenka / V. Katich, I. Krai, J.P. Ossel, J. Roma // II Aluminum. 1999. №9.

11. Роднов, О.О. Оценка технологического состояния электролизёра по флуктуациям приведенного напряжения / О.О. Роднов, А.И. Березин // Технико-экономический вестник РУСАЛа. – 2004. – №5. – С. 32-34.
12. Бегунов, А.И. Газогидродинамика и потери металла в алюминиевых электролизерах / А.И. Бегунов // Иркутск: ИрГТУ. – 1992. – 288 с.
13. Виноградов, А.В. Защита ВЛ, выполненных СИП, от грозových перенапряжений / А.В. Виноградов // КАБЕЛЬ–news. – 2009. – №4. – С. 31 – 34.
14. Воздвиженский, В.А. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями / В.А. Воздвиженский, А.Ф. Гончаров, В.Б. Козлов // М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 200 с.
15. Правила устройства электроустановок. Издание 7 – М.: НЦ ЭНАС. – 2004.
16. Гаврилова, Е.В. Анализ аварийности в системах электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий Сибири и основные направления по снижению аварийности / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, И.С. Зыков // Сборник материалов I международной научно-практической конференции «Интехмет-2008» // Санкт-Петербург. – 2008. – С. 22 – 24.
17. Беляев, А. И. Электролит алюминиевых ванн / А.И. Гаврилов // М.: Metallurgy – 1961. – 199 с.
18. Гаврилова, Е.В. Влияние процесса дугогашения выключателя на уровень и характер коммутационных перенапряжений / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2007. – С. 322 – 325.
19. Гаврилова, Е.В. Влияние типа и мощности электродвигателей и типа выключателей на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6-10 кВ горнодобывающих предприятий / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, В.А. Меньшиков, М.В. Коровина // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №3. – С. 6 – 9.

20. Гаврилова, Е.В. Исследование коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий в режиме однофазного замыкания на землю / Е.В. Гаврилова, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, Р.А. Майнагашев // Сборник материалов I международной научно-практической конференции «Интехмет-2008» // Санкт-Петербург. – 2008. – С. 66 – 67.

21. Гаврилова, Е.В. Опыт эксплуатации средств защиты от коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, Р.А. Майнагашев, С.В. Немков // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №4. – С.53 - 54.

22. Гаврилова, Е.В. Основные направления по снижению аварийности в системах электроснабжения 6-10 кВ промышленных предприятий / Е.В. Гаврилова, И.С. Зыков, Р.А. Майнагашев, В.В. Дементьев // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2008. – С.142 – 146.

23. Гаврилова, Е.В. Сравнительный анализ высоковольтных коммутационных аппаратов с точки зрения коммутационных перенапряжений, возникающих в системах электроснабжения электродвигателей / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, В.Н. Язев // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2007. – С. 280 – 285.

24. Гаврилова, Е.В. Устойчивость силовых трансформаторов 6 - 35 кВ к коммутационным перенапряжениям объектами / Е.В. Гаврилова, В.В. Павлов, Р.А. Майнагашев, И.С. Кузьмин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2009.

25. Гаврилова, Е.В. Электромагнитная совместимость средств защиты от коммутационных перенапряжений с защищаемыми объектами / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.Н. Язев, В.И. Суров, В.Е. Дубин, В.А. Меньшиков // Технико-экономический вестник РУСАЛа. – 2006. – №17 – С. 62 – 64.

26. Гандулин, Ф.А. Перенапряжения в сетях 6 – 35 кВ / Ф.А. Гандулин, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов // – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 192 с.
27. Герасимов, А.И. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий / А.И. Герасимов, С.В. Кузьмин // Учебное пособие. – Красноярск: ГУЦМиЗ. – 2005. – 250с.
28. Гинзбург, С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях / С. Г. Гинзбург // - М.: Высшая школа. – 1967. – 389 с.
29. Голубев, В.А. Вакуумные выключатели в электрических сетях открытых горных разработок / В.А. Голубев, В.А. Котлярчук // - М.: Недра. – 1975.
30. Гольдберг, О.Д. Влияние коммутационных перенапряжений на надежность электродвигателей / О.Д. Гольдберг, И.М. Комлев, Н.И. Суворов // Электротехника. – 1968. - №5. – С.14 – 18.
31. Гончаров, А.Ф. Анализ результатов измерения перенапряжений при коммутации высоковольтных двигателей экскаваторов / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн, Ю.Н. Попов // Электротехника. - 1986. - №9. - С.13 – 16.
32. Гончаров, А.Ф. Влияние РС-защиты от коммутационных перенапряжений на условия электробезопасности / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн, С.В. Кузьмин, Ю.Н. Попов // Изв. вузов – Горный журнал. – 1989. – №8.
33. Гончаров, А.Ф. Выбор защитных емкостей для высоковольтных двигателей экскаваторов с учётом тока однофазного замыкания на землю / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн // Изв. вузов. – Горный журнал. – 1986. – №11.
34. Дегтярев, И.Л. Режимы заземления нейтрали и защита от перенапряжений электрических сетей с вращающимися электрическими машинами / И.Л. Дегтярев, К.П. Кадомская, Р.В. Ког // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35кВ: Труды второй Всероссийской научно-технической конференции // Новосибирск. – 2002. – С.146 – 150.
35. Джуварлы, Ч.М. К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сетях с изолированной нейтралью / Ч.М. Джуварлы // Электричество. - 1953. - №6. – С.18 – 27.

36. Евдокунин, Г.А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения / Г.А. Евдокунин, Г. Тиллер // С.-Петербург: Издательство Сизова М.П. – 2002. – 147 с.
37. Евдокунин, Г.А. Перенапряжения в сетях 6 (10) кВ создаются при коммутации как вакуумными, так и элегазовыми выключателями / Г.А. Евдокунин, С. Гитенков // Новости электротехники. – 2002. - №5 (17). – С. 27 – 29.
38. Вильданов, Р.Г. Перспективы внедрения интеллектуальной электрической сети в России / Р.Г. Вильданов, Е.И. Буланкин // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля. Материалы Международной научно-методической конференции / редкол.: Н.Г. Евдокимова и др. – Уфа: изд-во УГНТУ. – 2016. – С. 150–153.
39. Закс, Л. Статистическое оценивание / Пер. с нем. В.Н. Варыгина. Под ред. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского // М.: Статистика. – 1976. – 598 с.
40. Зимин, В.И. Обмотки электрических машин: 7-е издание / В.И. Зимин, М. Я. Каплан, М. М. Палей // Л.: Энергия. – 1975. – 288 с.
41. Каганов, З. Г. Волновые напряжения в электрических машинах [Текст] / З.Г. Каганов // М.: Энергия 1970. – 209 с.
42. Каталог «Защитные аппараты. Ограничители перенапряжений» // - Великие Луки: ЗАО «Завод электрического оборудования». – 2000. – 32 с.
43. Каталог ОПН типа ОПН/TEL // М.: РК «Таврида Электрик». – 2007. – 8 с.
44. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов // М.: Высшая школа. – 1987. – 248 с.
45. Трофимов, Г.Г. Качество электроэнергии и его влияние на работу промышленных предприятий / Г.Г. Трофимов // Алма-Ата.: Каз. НИИНТИ – 1986. – 75 с.
46. Котлярчук, В.А. Исследование коммутационных перенапряжений при коммутации сетевых двигателей экскаваторов вакуумными выключателями. Отчет о НИР (промежут.) / КИЦМ; Руководитель В. А. Котлярчук. // Красноярск. – 1975. – 85 с.

47. Кузнецов, Д.В. К вопросу об эксплуатации силовых кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена / Д.В. Кузнецов, Ю.С. Попов, Ф.Х. Халилов, Н.А. Шилина // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. – №3. – С. 30 – 34.
48. Тихонов, В.А. Роль современной диагностики электрооборудования в повышении надёжности электроснабжения алюминиевых заводов / В.А. Тихонов, В.А. Ерощенко, В.А., М.И. Бастрыкин // Электрика. – 2006. – №5. – С. 26 – 28.
49. Поляхов, Д.Н. Самоорганизующаяся экспертная система для диагностики электрооборудования энергосистем / Д.Н. Поляхов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург. – 2005. – 125 с.
50. Трофимов, Г.Г. Анализ несинусоидальных режимов в электрических распределительных сетях / Г.Г. Трофимов / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Новосибирск. – 1991. – 43 с.
51. Жежеленко, И.В. Взаимное сопротивление электрических сетей на частотах гармоник / И.В. Жежеленко, Ю.Д. Саенко // Энергетика (Изв. Вузов СССР), – №2. – 1989. – С. 26 – 28.
52. Трофимов, Г.Г. Частотные характеристики активного сопротивления распределительных элементов электрических сетей / Г.Г. Трофимов, В.В. Сысоев // Электромеханика. (Изв. Вузов СССР). – Минск.: – №9. – 1982. – С. 1103 – 1106.
53. Базыкин, Р.В. Поверхностный эффект в шинах двояковогнутого профиля / Р.В. Базыкин // Энергетика (Изв. Вузов СССР). – Минск.: – №1. – 1984. – С. 28 – 32.
54. Герасимович, А.Н. Расчет токораспределения в многополосных шиннопроводах / А.Н. Герасимович, Д.А. Герасимович // Энергетика (Изв. Вузов и энергообъединений СНГ). – Минск.: – № 1. – 1997. – С. 25 – 32.
55. Кузьмин, С.В. Проблемы перенапряжений при использовании вакуумных коммутационных аппаратов / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, Р.А. Майнагашев, Б.С. Заварыкин, И.В. Краснова // Сборник материалов международной научно-практической конференции: "Стратегические приоритеты и инновации в про-

изводстве цветных металлов и золота". ГОУ ВПО "ГУЦМиЗ". – Красноярск. – 2006. – С.183 – 187.

56. Кузьмичева, К.И. Ограничение перенапряжений при отключении вакуумными выключателями пусковых токов электродвигателей с помощью ОПН / К.И. Кузьмичева, В.Н. Подъячев, И.Л. Шлейфман // Электростанции. – 1996. - №4.

57. Куликовский, В.С. Защита высоковольтных электродвигателей экскаваторов от коммутационных перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями / В.С. Куликовский // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2002. – 26 с.

58. Куликовский, В.С. Защита высоковольтных электродвигателей экскаваторов от коммутационных перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями / В.С. Куликовский // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2002.

59. Скакунов, Д.А. Методы и средства обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях 0,4 - 6 кВ нефтеперерабатывающих предприятий / Д.А. Скакунов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2010.

60. Headley A. Meeting system requirements with modern switchgear / Proceedings IEEE Symp. On trends in modern switchgear design 3,3 – 150 kV // Newcastle. – 1984. – pp.9.1 – 9.5.

61. Working group paper: Interruption of small inductive currents (chapter 1, 2) // Electra. – 1980. - №72. – pp.73 – 103.

62. Yokokura, K. Multiple restriking voltage effect in a vacuum circuit breaker on motor insulation / K. Yokokura, S. Masuda, H. Nishikava // "IEEE Trans. on PAS" Vol PAS-100. – 1981. - №4.

63. Меньшиков В.А. Методология исследования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий напряжением 6 (10) кВ и разработка мероприятий и средств по их ограничению / В.А. Меньшиков // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2006.

64. Matsui, Y. Reignition current interruption characteristics of the vacuum interrupters / Y. Matsui, T. Yokoyama, E. Umeya // IEEE Trans. on Power Delivery. Vol.3. – 1988. – № 4. – p. 1672 – 1677.
65. Немцов, М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности / М.В. Немцов, Ю.М. Шамаев // - М.: Энергоиздат. – 1981. – 136 с.
66. Семчинов, А.М. Ртутно-преобразовательные и полупроводниковые подстанции / А.М. Семчинов // Л.: Энергия – 1968. – 260 с.
67. Северюхин, В.Л. Влияние КПП на работу электролизной серии / В.Л. Северюхин // Технико-экономический вестник РУСАЛа. – 2000. – №15. – С. 15 – 19.
68. Макаров, М.А. Стабилизация энергетического режима серий электролиза / Макаров М.А., Кузнецов И.Г., Бовкун А.Н. // Сб. научно-исследовательских работ ИРКАЗ СУАЛ. Шелехов. – 2000. – С. 164 – 171.
69. 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.
70. Тихонов, В.А. Исследование трансформаторов 220 кВ с целью хромотографического анализа растворённых газов с помощью базы знаний экспертного регулятора / В.А. Тихонов // Современные наукоёмкие технологии. – 2018. – №5. – С. 163-167.
71. Тихонов, В.А. Анализ дефектов в преобразовательных трансформаторах и пути снижения их аварийности / В.А. Тихонов // Энергетик. – 2019. – №2. – С. 11-15.
72. Канбан и «точно вовремя» на Toyota: Менеджмент начинается на рабочем месте / Пер. с англ. // М.: Альпина Бизнес Букс. – 2008. – 218 с.
73. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ [Текст] // М.: СПО ОРГРЭС. – 2003.
74. Тихонов, В.А. К вопросу эксплуатации электрооборудования / В.А. Тихонов // Цветные металлы. – 2019. – №3. – С. 72-76.

75. Филиппов, В.И. Исследования и пути повышения надежности систем распределения электрической энергии на разрезах Канско–Ачинского бассейна / В.И. Филиппов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 1972.
76. Фишман, В. Способы заземления нейтрали в сетях 6 - 35 кВ. Точка зрения проектировщика / В.Фишман // Новости электротехники. – 2008. – №2(50).
77. Артюнова, Д.В. Стратегический менеджмент : Учебное пособие / Д.В. Артюнова // Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. – 2010. – 122 с.
78. Тихонов, В.А. О влиянии периодичности диагностических измерений на повышение надёжности высоковольтных трансформаторов / В.А. Тихонов // Надёжность и безопасность энергетики. – 2019. – Том 12. – №1.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1**Сводный отчёт отказов, при проводимой диагностике**

Таблица П.1 – Сводный отчёт отказов, при проводимой диагностике

№	Месяц	Количество отказов трансформаторов, шт	Количество отказов выключателей, шт	Количество диагностических измерений, шт
1	Январь	10	25	42
2	Февраль	9	24	48
3	Март	10	26	52
4	Апрель	9	23	50
5	Май	8	22	60
6	Июнь	9	18	78
7	Июль	8	16	84
8	Август	7	12	88
9	Сентябрь	6	10	89
10	Октябрь	7	9	90
11	Ноябрь	6	8	91
12	Декабрь	5	7	92

ПРИЛОЖЕНИЕ 2**ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ****Справка**

о внедрении результатов диссертационной работы
Тихонова Валерия Алексеевича

**«Совершенствование методов сбора и анализа эксплуатационных параметров электрооборудования и трансформаторов в системах электро-снабжения 10-220кВ алюминиевой промышленности»
на ОАО «РУСАЛ-Братск»**

На предприятии ОАО «РУСАЛ – Братск» с 2013г. используются следующие результаты вышеуказанной диссертационной работы:

1. Комплексный метод сбора и анализа текущего состояния электрооборудования и трансформаторов напряжением 10-220кВ.
2. Усовершенствованный метод организации ремонтных работ на основе системы КАНБАН.

Использование указанных методов позволило своевременно и рационально определить период выполнения ремонтных работ, повысить их качество и эффективность.

Длительность выполнения ремонтных работ в зависимости от типа оборудования сократилось на 5-15%, что позволило получить экономический эффект за счёт более раннего ввода в эксплуатацию электрооборудования и, как следствие, расширение возможностей технологического процесса по производству алюминия.

Главный Энергетик ПАО «РУСАЛ Братск»

Згрундо С.М.

Подпись представителя



(печать)

Справка
о внедрении результатов диссертационной работы
Тихонова Валерия Алексеевича

**«Совершенствование методов сбора и анализа эксплуатационных параметров электрооборудования и трансформаторов в системах электропитания 10 кВ алюминиевой промышленности»
в филиале ПАО «РУСАЛ-Братск» в г. Шелехов**

На предприятии филиал ПАО «РУСАЛ – Братск» в г. Шелехов с 2013г. используются следующие результаты вышеуказанной диссертационной работы:

1. Комплексный метод сбора и анализа текущего состояния электрооборудования и трансформаторов напряжением 10 кВ.
2. Усовершенствованный метод организации ремонтных работ на основе системы КАНБАН.

Использование указанных методов позволило своевременно и рационально определить период выполнения ремонтных работ, повысить их качество и эффективность.

Длительность выполнения ремонтных работ в зависимости от типа оборудования сократилось на 5-15%, что позволило получить экономический эффект за счёт более раннего ввода в эксплуатацию электрооборудования и, как следствие, расширение возможностей технологического процесса по производству алюминия.

Главный энергетик филиала ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов

Макаров М. А.

Подпись представителя



Общая канцелярия завода

ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов
Иркутская обл.

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы
Тихонова Валерия Алексеевича

**«Совершенствование методов сбора и анализа эксплуатационных параметров электрооборудования и трансформаторов в системах электро-снабжения 10-220кВ алюминиевой промышленности»
на АО «РУСАЛ-Саяногорск»**

На предприятии АО «РУСАЛ – Саяногорск» с 2013г. используются следующие результаты вышеуказанной диссертационной работы:

1. Комплексный метод сбора и анализа текущего состояния электрооборудования и трансформаторов напряжением 10-220кВ.
2. Усовершенствованный метод организации ремонтных работ на основе системы КАНБАН.

Использование указанных методов позволило своевременно и рационально определить период выполнения ремонтных работ, повысить их качество и эффективность.

Длительность выполнения ремонтных работ в зависимости от типа оборудования сократилось на 5-15%, что позволило получить экономический эффект за счёт более раннего ввода в эксплуатацию электрооборудования и, как следствие, расширение возможностей технологического процесса по производству алюминия.

Главный Энергетик
АО «РУСАЛ Саяногорск»

(печать)



А.В. Лосоногов

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ДИПЛОМ УЧАСТНИКА МЕЖДУНАРОДНОЙ КНИЖНОЙ
ВЫСТАВКИ