

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

На правах рукописи



Дмитриев Вячеслав Валентинович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
БАЛАНСИРОВКИ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Доктор технических наук, профессор
Грязев Михаил Васильевич

Тула – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Анализ конструктивных схем, методов расчёта и моделирования режимных параметров электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей.....	12
1.1. Физические процессы, их характеристики, методы моделирования и расчета режимных параметров.....	12
1.2. Анализ конструктивных схем электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты.....	26
1.3. Цель и задачи исследования.....	37
1.4. Выводы.....	38
Глава 2. Определение структуры функциональных связей электротехнических и электромеханических устройств и уровня надёжности функционирования систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей.....	41
2.1. Разработка структуры функциональных связей в электротехнических и электромеханических системах балансировки и электрохимической защиты.....	41
2.2. Определение уровня надёжности и условий реализуемости электротехнических и электромеханических систем.....	48
2.3. Расчёт показателей надёжности и режимных параметров эффективного функционирования электротехнических и электромеханических систем.....	55
2.4. Выводы.....	58
Глава 3. Определение показателей надёжности эффективного функционирования электротехнических и электромеханических систем	

балансировки газораспределительных сетей и их электрохимической защиты.....	60
3.1. Разработка новых технических решений для повышения эффективности функционирования электротехнических и электромеханических систем.....	60
3.2. Математическое описание взаимодействия электротехнических и электромеханических элементов.....	70
3.3. Определение рациональных конструктивных и режимных параметров электротехнических и электромеханических систем.....	91
3.4. Выводы.....	94
Глава 4. Экспериментальные исследования электротехнических и электромеханических устройств для повышения эффективности балансировки газораспределительных сетей и их электрохимической защиты.....	96
4.1. Планирование эксперимента и аппаратуры исследований... ..	96
4.2. Физическое моделирование электротехнических и электромеханических устройств балансировки газораспределительных сетей и их электрохимической защиты.....	102
4.3. Экспериментальные исследования.....	109
4.4. Выводы.....	117
Заключение.....	119
Библиографический список.....	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы: в условиях опережающего роста тарифов на газ возрастает роль энергоэффективности и снижения затрат на техническое обслуживание газораспределительных сетей за счёт совершенствования и создания новых технических решений по электротехническим и электромеханическим системам их балансировки и электрохимической защиты газопроводов, автоматизированного - централизованного управления режимами работы систем и сетей.

Подземные газопроводы находятся в исключительно сложных условиях эксплуатации. Они подвергаются опасности как наружного, так и внутреннего разрушения, вызванного возникновением недопустимых напряжений в сечении стенки стальной трубы и процессами коррозии, что приводит в совокупности к локальным концентраторам напряжений. Учитывая, что распределительный газопровод находится и под редуцированным, но достаточно большим внутренним давлением, ещё одним индикатором опасности коррозионного разрушения является соотношение текущих значений напряжённо-деформированного состояния стенок труб с пределами прочности и текучести трубной стали.

При условии допустимой остаточной толщины стенки стальных газопроводов не менее $15\div 25\%$ от проектной величины вероятность их отказа может достигать 30% [39, 40].

Поэтому, повышение срока службы газопроводов должно быть обеспечено диагностикой технического состояния газораспределительных сетей, электрохимической их защиты, созданием электротехнических и электромеханических систем балансировки и управления их электрохимической защитой на основе их взаимного влияния на формирование переходных процессов и режимов работы как систем, так и сетей, что является актуальной научной задачей.

Цель работы – повышение эффективности функционирования электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей путем обоснования рациональной структуры их функциональных связей, параметров и закономерностей формирования управляющих воздействий, обеспечивающих требуемый уровень надёжности, гибкости управления режимами работы и электрохимической защиты газопроводов.

Для достижения поставленной цели сформированы и должны быть решены следующие **задачи исследования**:

1. Анализ конструктивных схем, методов расчёта параметров и надёжности электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей и условий их эксплуатации.
2. Определение функциональных связей электротехнических и электромеханических устройств систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, учитывающих в комплексе закономерности формирования режимных параметров и характеристик технического состояния газопроводов.
3. Разработка математической модели формирования топологии и управляющих воздействий в электротехнических и электромеханических системах балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, обеспечивающих требуемый уровень надёжности и эффективности их функционирования.
4. Обоснование рациональных параметров электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей для формирования требуемого уровня надёжности режимов работы и характеристик технического состояния газопроводов.

5. Определение условий реализуемости конструкционной и функциональной надёжности электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, обеспечивающих рациональные режимы работы газопроводов и их техническое состояние.
6. Разработки методики определения рациональных параметров электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, структуры и топологии управления режимами работы газопроводов.
7. Численные и экспериментальные исследования режимов работы электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей при применении разработанных новых технических решений по управлению переходными процессами при эксплуатации.

Идея работы заключается в достижении требуемого уровня надёжности функционирования электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов на основе эффективного управления их переходными процессами и режимами работы газопроводов, учитывающего их взаимное влияние при формировании управляющих воздействий в зависимости от диагностирования технического состояния систем и сетей.

Объект исследования – электротехнические и электромеханические системы балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, учитывающих в комплексе формирование соотношений текущих значений напряжённо-деформированного состояния стенок стальных газопроводов и их коррозии, управляющих воздействий, обеспечивающих требуемый уровень показателей эффективности режимов работы систем и сетей.

Предметом исследования являются переходные процессы в электрохимических и электромеханических системах балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, режимов работы систем и сетей с учётом влияния на эффективность формирования управляющих воздействий в зависимости от диагностирования технического состояния.

Методы исследования, используемые в работе, основаны на применении теории электрических цепей, автоматического управления, теории надёжности технических систем, вероятностей и математической статистики, численных и экспериментальных методов исследований с применением ЭВМ.

Автор защищает:

1. Методика обоснования контактных и бесконтактных способов диагностики технического состояния и режимов работы электротехнических и электромеханических системах балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, учитывающих в комплексе характеристики изоляции газопроводов и условия формирования переходных процессов в системах и сетях.
2. Математические модели переходных процессов в электрохимических и электромеханических системах балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, учитывающие в комплексе режимы работы систем и сетей.
3. Способы формирования закономерностей управляющих воздействий в электрохимических и электромеханических системах балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, учитывающих в комплексе диагностирование текущих

показателей их технического состояния и характеристик переходных процессов систем и сетей.

4. Условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности электротехнических и электромеханических системах балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, обеспечивающих требуемый уровень эффективности их функционирования и рациональных режимов работы систем и сетей.

Научная новизна заключается в определении рациональных параметров и закономерностей формирования управляющих воздействий электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, обеспечивающих требуемый уровень эффективности их функционирования и управления режимами работы систем и сетей.

Она представлена следующими результатами:

1. Определены зависимости для расчёта рациональных параметров электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, учитывающих в комплексе влияние характеристик переходных процессов и режимов работы систем и сетей, и, диагностирование как их текущих значений, так и технического состояния.
2. Установлены методы обоснования контактных и бесконтактных способов диагностики технического состояния и режимов работы электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, учитывающих в комплексе характеристики изоляции газопроводов и условия формирования переходных процессов в системах и сетях.

3. Установлены способы формирования закономерностей управляющих воздействий в электрохимических и электромеханических системах балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты, учитывающие в комплексе диагностирование текущих показателей их технического состояния и характеристик переходных процессов систем и сетей.
4. Разработана методика расчёта рациональных параметров электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, и, определения структуры и топологии управления режимами работы систем и сетей.
5. Определены условия реализации конструкционной и функциональной надёжности электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, обеспечивающих требуемый уровень эффективности их функционирования и рациональных режимов работы.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы обеспечены обоснованными допущениями, адекватностью результатов теоретических и экспериментальных исследований, расхождения между которыми не превышают 14,5%, что допустимо в инженерных расчётах.

Практическое значение. Разработаны новые технические решения и методика расчёта рациональных параметров электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, определена структура и топология управления режимами работы систем и сетей, учитывающих в комплексе формирование управляющих воздействий в зависимости от диагностики технического состояния и требуемого уровня эффективности их

функционирования. Экономический эффект от электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, обеспечивающих требуемый уровень эффективности их функционирования в комплексе составляет ... рублей.

Реализация результатов работы.

Основные научно-практические результаты диссертационной работы использованы «Газпром – газораспределение Калуга» в «Программе повышения эффективности».

Результаты работы использованы в учебных курсах «Средства коммутации электрической энергии», «Специальные методы анализа параметров устройств автоматического управления и релейной защиты в электроэнергетике» и «Релейная защита и системная автоматика» на кафедре «Электроэнергетика» Тульского государственного университета.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях.

Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2012» в рамках X Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2012 г.), Международной научно-технической конференции «Энергоэффективность-2012» в I Международного электроэнергетического форума «Электросетевой комплекс. Инновации. Развитие» (г. Москва, 2012 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2013» в рамках XI Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2013 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2014» в рамках XII Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2014 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2015» в рамках XIII Московского международного энергетического форума

«ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2015 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2016» в рамках XIV Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2016 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2017» в рамках XV Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2017 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 печатных работах, из них 6 статей – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, издана 1 монография, имеется 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы.

Автор выражает благодарность Ректору Тульского государственного университета, доктору технических наук, профессору Грязеву Михаилу Васильевичу и заведующему кафедрой «Электроэнергетика» Тульского государственного университета, доктору технических наук, профессору Степанову Владимиру Михайловичу за научные консультации, поддержку и помощь при работе над диссертацией.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ, МЕТОДОВ РАСЧЁТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ БАЛАНСИРОВКИ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

1.1. Физические процессы, их характеристики, методы моделирования и расчета режимных параметров

Физические процессы в электротехнических и электромеханических системах балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов отражают их реакцию на соотношение текущих значений напряжённо-деформированного состояния стенок труб с пределами прочности и текучести трубной стали, и, учитывают формирование локальных концентраторов напряжений и условие допустимой остаточной толщины стенки стальных газопроводов не менее 15÷25% от проектной величины. Локальные концентраторы напряжений – зоны концентрации напряжений (ЗКН) [29, 33-51, 70, 78, 79, 81, 82, 95, 99, 104, 105].

В ЗНК и в зонах развивающихся повреждений возникают магнитные аномалии, амплитуда и периодичность которых связаны с деформацией газопроводов и видом коррозионно-усталостного повреждения (утонение стенки стальной трубы, язвы с наружной и внутренней её поверхностей), в основу контроля за их формированием используется магнитно-метрический метод выявления аномалий в распределении магнитного поля и установлении связи этих аномалий с ЗКН и различными видами развивающихся повреждений. Поэтому при диагностике газопроводов через слой изоляции используются критерии, разработанные в методе магнитной памяти металла (МПМ)[33-35, 39, 40-51, 104].

В ЗКН деформация газопровода происходит вместе со слоем изоляции, жестко связанной с трубой. Даже в случае наличия в изоляции

скрепляющей сетки "рабица", информация о нерасчетной деформации трубы передается через деформацию сетки в виде магнитных аномалий, фиксируемых на поверхности изоляции[33, 39, 104].

Учитывая, что распределительный газопровод находится под редуцированным, но достаточно большим внутренним давлением, наличие ЗКН и коррозионных разрушений и взаимное их влияние на формирование концентраторов напряжений требует регулирования давления в газораспределительных сетях с учётом соотношений текущих значений напряжённо-деформированного состояния (НДС) стенок труб с пределами прочности и текучести трубной стали, и, эффективности управления электрохимической защитой газопроводов.

Поскольку балансировка газораспределительных сетей обеспечивается регуляторами давления газа комбинированного типа РДНК вручную, то в этом случае должна быть применена для этой цели электромеханическая система. [104, 105]

Постоянный и действенный контроль как за изменениями давления газа в газопроводе, так и за эффективностью их электрохимической защиты обеспечивается электротехническими системами диагностики, имеющими обратную связь с электротехническими устройствами, формирующими управляющие воздействия на исполнительные электромеханические и электротехнические элементы для балансировки газораспределительных сетей и эффективностью электрохимической защиты их газопроводов.

Электротехнические системы диагностики по обнаружению, локализации и классификации дефектов производится дистанционно, путём интерпретации непрерывно регистрируемых параметров магнитного поля. Получаемый с электротехнического устройства – магниторезистивных датчиков сигнал преобразовывается с помощью аналого-цифрового преобразователя в код, поступающий на компьютер. Программное обеспечение позволяет обработать поступающую информацию и отобразить её на мониторе в режиме реального времени. Физические процессы

приведены на рис.1.1.1 в виде примера магнитограмм различных локальных дефектов.

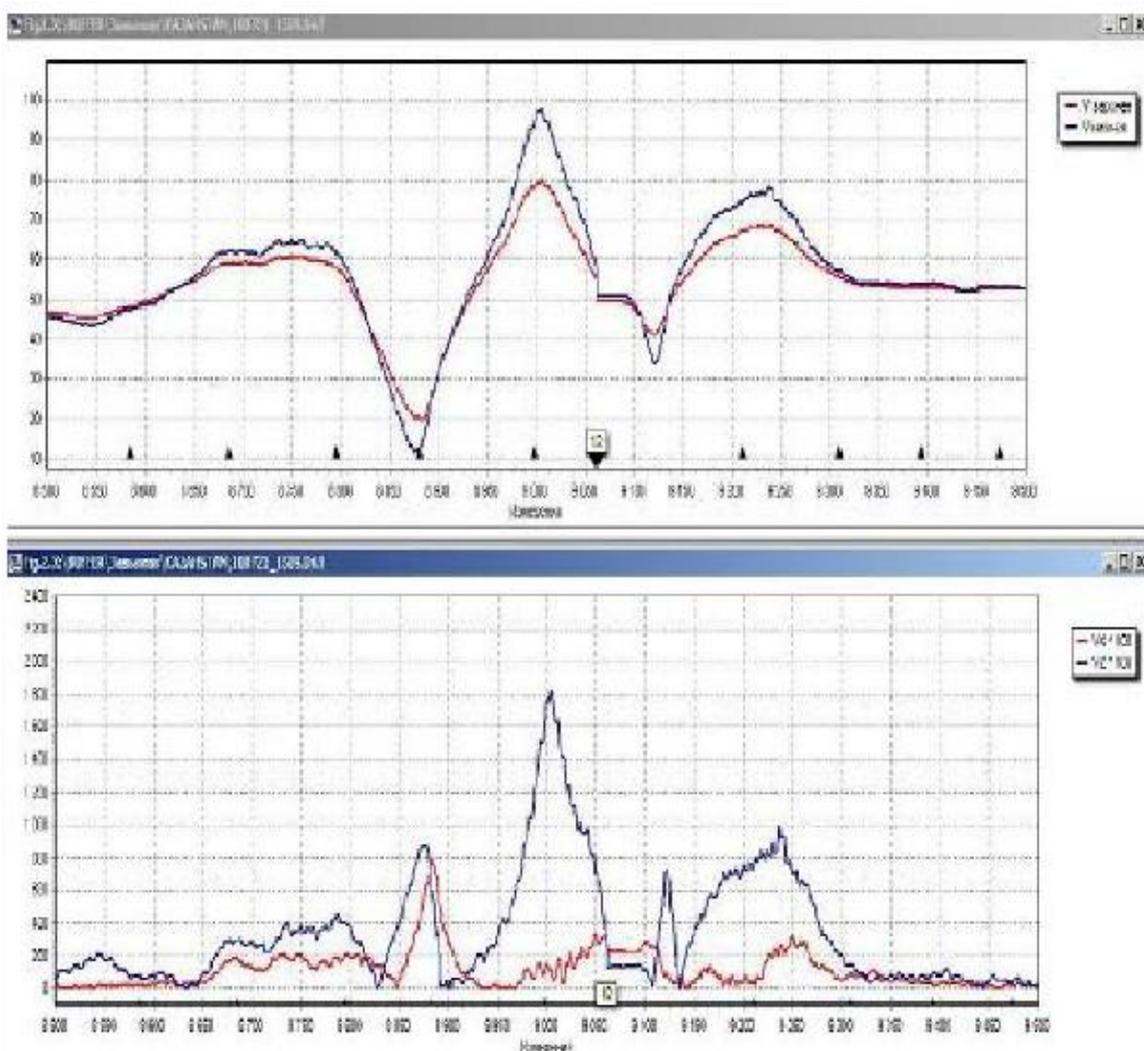


Рис.1.1.1. Примеры магнитограмм различных локальных дефектов

Формирование физических процессов в электротехническом устройстве контроля основано на эффекте Виллари (магнитоупругий эффект) – изменение формы магнитного поля. В качестве первичных преобразователей в электротехническом устройстве используются трёхкомпонентные векторные датчики, принцип работы которых основан на анизотропном магниторезистивном эффекте. Для каждого типа дефекта аномалии магнитного поля имеют определённый характерный вид, что позволяет идентифицировать их по типам: локальные коррозии; напряжённо-

деформированные состояния; зоны трещин; трещиноподобные дефекты (рис.1.1.2).

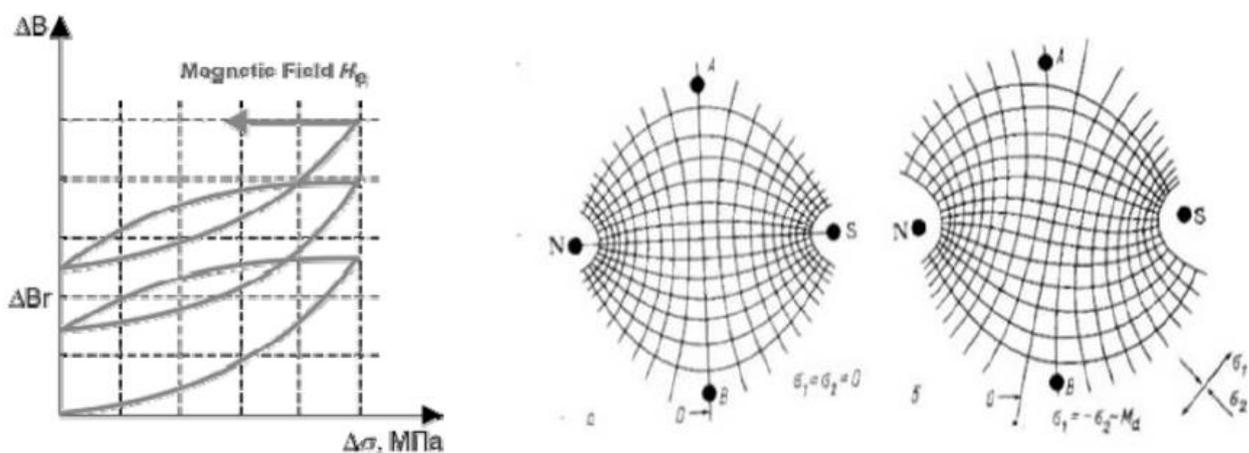


Рис. 1.1.2

Для контроля за изменениями давления в газораспределительных сетях применяются датчики давления газа, работающие на основе физических процессов преобразования давления в электрический сигнал, обеспечивающий передачу его для использования как источника информации переходных процессов в газопроводах и как обратную связь для регулятора давления. Причём давление газа пропорционально величине напряжения или тока, что характеризует качество и чувствительность при регистрации физических процессов [29, 33, 39, 104, 105].

Из анализа физических процессов как в обследуемых объектах и в электротехнических и электромеханических системах балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты следует, что они должны иметь требуемый уровень разрешающей способности и чувствительности, качества преобразования в электрический сигнал, удобный для передачи информации и технико-технологического их использования для диагностики, как сетей, так и систем [30, 33-56, 58, 88-92, 95, 99, 104, 105].

Математическое моделирование переходных процессов в электротехнических устройствах контроля, системе сбора и передачи информации, её преобразований для оценки технического состояния газопроводов и формирования управляющих воздействий для управления переходными процессами в них можно построить в классе линейных преобразований. Поэтому одним из направлений исследования по установлению связи вход-выход в них является применение методов теории линейных систем [1-12, 14-31, 3983, 87-96, 99, 101-105].

Решение научно-технической задачи контроля и передачи сигналов в этом случае, используя методы линейных систем может быть представлено в форме линейного интегрального оператора – интеграла суперпозиции

$$y(\varepsilon) = \hat{L}x(\varepsilon) = \int_{[\leftrightarrow]} A(\varepsilon, \varepsilon')x(\varepsilon')d\varepsilon', \quad (1.1.1)$$

где $x(\varepsilon)$ – вход линейной системы; $y(\varepsilon)$ – выход линейной системы; \hat{L} – оператор, описывающий преобразование входа $x(\varepsilon)$ в выход $y(\varepsilon)$; $(\varepsilon; \varepsilon')$ – независимые переменные в n -мерном пространстве, которые могут быть пространственными, временными и частотными переменными; $A(\varepsilon; \varepsilon')$ – аппаратно-элементарная функция (АЭФ) – полная характеристика линейной системы, которая может быть выражена в форме действия линейного оператора \hat{L} на δ -воздействие и является полной характеристикой этой системы или её элемента. Свойство δ -функции многих переменных позволяет конкретизировать влияние различных переменных на свойства АЭФ.

Разделение переменных на пространственные и частотные позволяет отдельно рассматривать как АЭФ, так и АФ системы, формирующего измеряемый параметр электротехническим устройством или системой контроля и управления, который зависит от пространственных переменных.

В результате возникают информационная, структурная и временная избыточности позволяющие повысить эффективность функционирования как электротехнических устройств, так и систем контроля и управления[13, 31].

Формирование управляющих воздействий распределением контролируемых параметров и эффективностью использования электротехнических устройств контроля и управления устанавливаемое на основе нейронной сети выполняет функцию модели измеряемых и управляемых потоков, а также реакции его на изменение состояния анализирующих элементов и измеряемых и управляющих систем при известных контролируемых параметрах, позволяет получить цифровую модель указанных потоков

$$V(x,y)=0, \quad (1.1.2)$$

где V – вектор функция контролируемых и управляемых параметров в узлах взаимосвязанных элементов и контролирующих и управляющих систем; x и y – векторы-столбцы зависимых и независимых параметров режимов работы электротехнических устройств контроля и управления, элементов и систем в целом (рис. 1.1.3.).

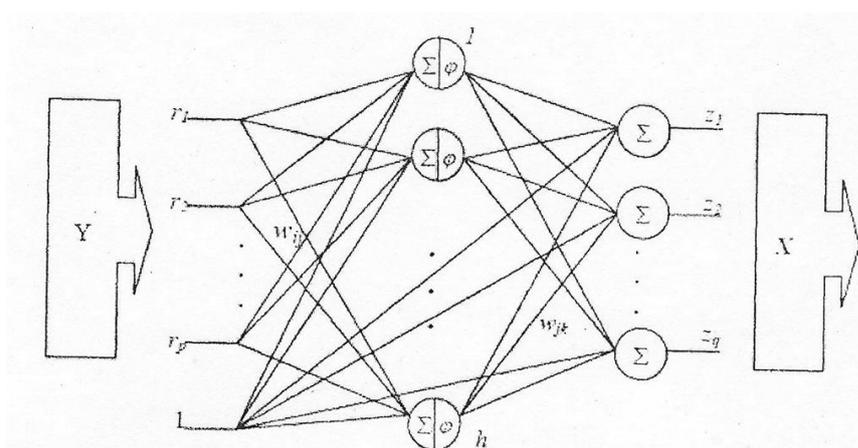


Рис. 1.1.3. Структура нейронной сети для определения топологии, структуры и функциональных связей конструктивных схем контроля и управления, и, расчёта контролируемых и управляемых параметров режимов их работы

Задача формирования структуры функциональных связей конструктивных схем контроля и управления, и, расчёта установившихся их режимов сводится к минимизации суммы квадратов невязок узловых контролируемых и управляемых параметров.

$$Z = \sum_j [y_j(D) - y_j]^2 \rightarrow \min, \quad (1.1.3)$$

где Z – целевая функция, отражающая сумму невязок контролируемых и управляемых параметров на j -ой итерации для электротехнических устройств контроля и управления, и, контролируемых и управляемых систем, состоящих из j элементов.

На основании анализа использование нейронной сети с применением соответствующего математического аппарата осуществляется моделирование режимов работы конструктивных схем контроля и управления [29, 32].

Изоляционные покрытия не гарантируют необходимой защиты газопровода от коррозии. Достаточно эффективная защита может быть обеспечена только при нанесении покрытий и применении электрохимической защиты (комплексная защита).

Электрохимической называется защита от коррозии, осуществляемая путем поляризации от внешнего источника тока или путем соединения с металлом, имеющим более отрицательный (катодная поляризация) или более положительный потенциал (анодная поляризация), чем у защищаемого металла.

Электрохимическая защита - подавление анодных токов катодными с помощью внешнего источника. Действительно, если ток натекающий на участок трубопровода больше, чем ток стекающий с него (см. точку а на рис.1.1.4), то анодный процесс сменится катодным.

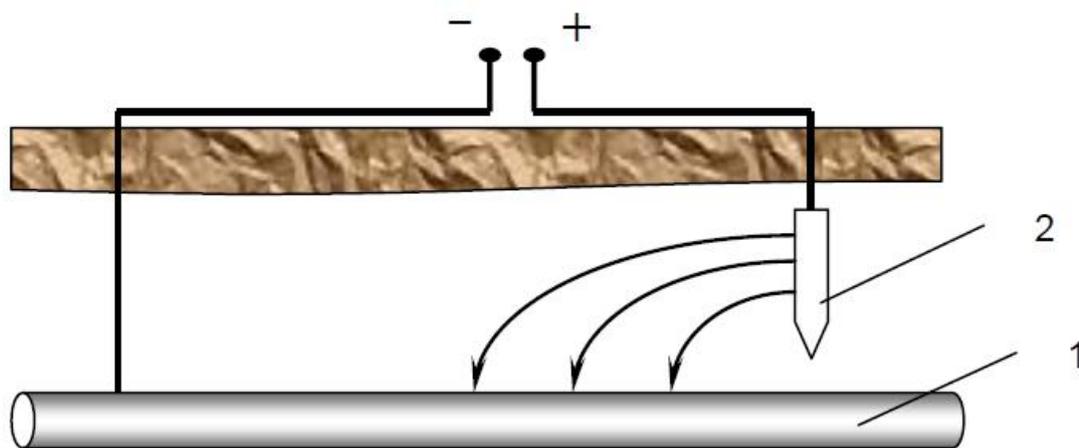


Рис.1.1.4. Поле коррозионных и защитных токов при электрохимической защите. 1-защищаемый подземный трубопровод; 2-вспомогательный электрод-анод внешнего источника тока.

До тех пор, пока металлическое сооружение работает катодом - оно вечно. Но вечность не дается даром. Мало того, что на электрохимическую защиту расходуется электрическая энергия внешнего источника (рис.1.1.4), еще и разрушается вспомогательный электрод защитной установки - анод 2. Если ток на защищаемое сооружение натекает, то с анода он должен стекать. Пока "живет" катод-трубопровод, разрушается жертвенный анод. Это свойство катода "вечно жить за счет жертвы" и использовано при электрохимической защите.

В соответствии с распространенной классификацией способов защиты от коррозии электрохимическую защиту относят к активным способам, в то время как защиту с помощью изоляционных покрытий - к пассивным способом. Оба эти способа применяются на подземных металлических сооружениях совместно.

При этом можно считать, что пассивная защита - основной или главный способ защиты, активная - вспомогательный.

Итак, изоляционное покрытие ограждает, а электрохимическая защита подавляет.

При защите газопроводов применяется катодная поляризация.

При катодной поляризации металла скорость коррозии металла уменьшается при смещении его потенциала в область значений более отрицательных, чем стационарный потенциал корродирующего металла. Такое смещение потенциала обеспечивается подводом к металлу избыточных электронов за счет внешнего источника тока.

При соприкосновении металла с электролитом происходит растворение металла. Растворение прекращается, когда раствор станет насыщенным. Устанавливается состояние равновесия, т.е. скорость окисления равна скорости восстановления. В результате перехода катионов (+) металла в раствор на поверхности металла и прилегающем к ней слое раствора возникает заряд (-). Между этими двумя заряженными слоями существует разность потенциалов (скачок потенциала). При наступлении равновесия скачок потенциала примет значение, отвечающее равновесию (равновесный потенциал). Если в силу каких-либо причин равновесный потенциал установиться не может, то металл будет либо постоянно растворяться, либо восстанавливаться (катионы металла будут оседать на поверхности и входить в состав кристаллической решетки). Такой причиной может быть внешний источник тока.

Явление поляризации рассмотрим на примере работы установки, изображенной на рис.1.1.5. При пропускании электрического тока через раствор электролита можно заметить, что сила тока постепенно уменьшается.

(Вспомним закон Ома: $I = U/R$, следовательно, снижение силы тока обусловлено увеличением сопротивления в цепи).

Так как омическое падение напряжения в электролите, в соединительных проводниках и сопротивление источника питания постоянно, то, следовательно, увеличение сопротивления в цепи происходит за счет изменения электрохимических потенциалов электродов.

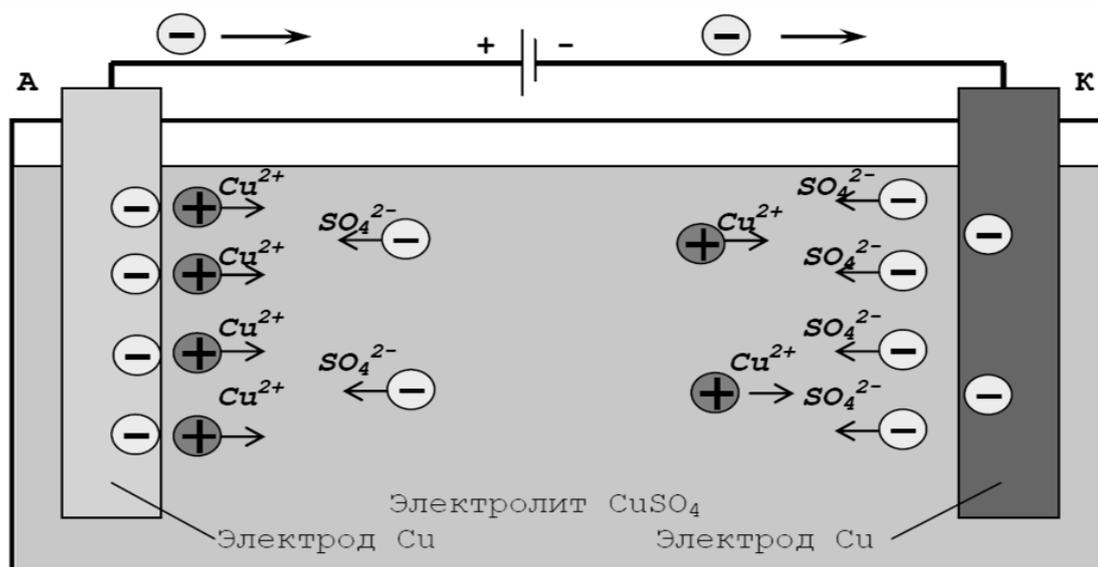


Рис.1.1.5. Поляризация электродов под действием внешнего источника тока.

При электрохимической защите возникает эффект катодной поляризации: потенциал корродирующей поверхности приобретает катодное смещение, в результате чего электрохимический потенциал защищаемого сооружения становится электроотрицательнее своего стационарного потенциала.

При защите методом катодной поляризации ток защиты стекает в окружающую среду со специального заземлителя или протектора, проходит сквозь грунт и втекает в сооружение. Этим достигается перемещение коррозионного процесса с защищаемого сооружения на заземлитель или протектор.

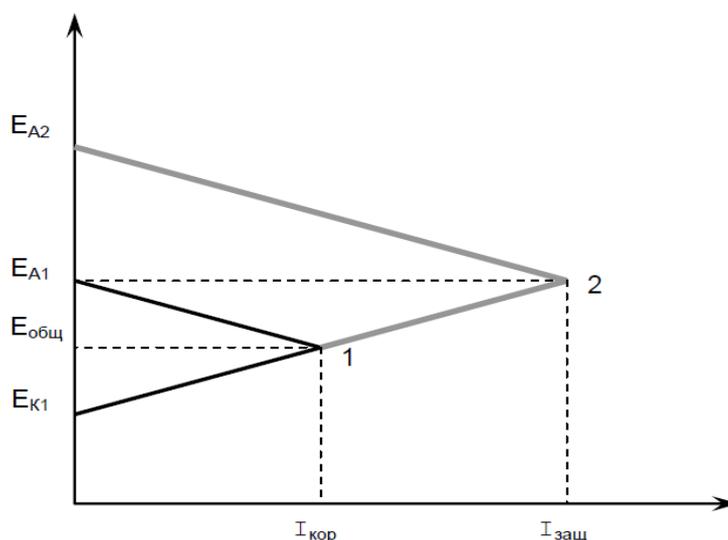


Рис. 1.1.6. Поляризационная коррозионная диаграмма, объясняющая механизм электрохимической защиты: E_{A1} , E_{K1} -потенциалы анода и катода до поляризации; E_{A2} -потенциал дополнительного электрода; 1-2-поляризация катода в связи с подключением дополнительного электрода; $I_{кор}$ -ток коррозии; $I_{защ}$ -ток защиты.

Система электродов, образующая коррозионный элемент, при электрохимической защите поляризуется катодно подключением дополнительного электрода (от внешнего источника тока).

При электрохимической защите в простейшем случае получают трехэлектродную систему.

Для прекращения работы коррозионной пары E_{K1} - E_{A1} необходимо, чтобы катод был поляризован до точки 2, соответствующий уровню потенциала E_{A1} . Это достигается подключением к системе E_{K1} - E_{A1} дополнительного, более отрицательного электрода E_{A2} , поляризация которого выражается кривой E_{A2} -2, что соответствует току защиты.

Из рассмотрения коррозионной диаграммы (рис. 1.1.6) следует, что ток защиты всегда должен быть больше коррозионного тока. Ток коррозии равен 0

$$I = \frac{E_K - E_A}{R_\Gamma + R_K + R_A} = 0, \quad (1.1.4)$$

при достижении равенства потенциалов катодных и анодных участков, т.е. $E_K = E_A$.

Метод катодной поляризации предусматривает смещение электродного потенциала металла в отрицательную сторону до значений так называемого минимального защитного потенциала, при котором скорость растворения не превышает заданной величины. При этом смещение потенциала металла до заданного значения осуществляется путем катодной поляризации от внешнего источника тока. Катодную поляризацию осуществляют при помощи специальных установок катодной дренажной и протекторной защиты.

Скорость коррозии уменьшится до технически допустимой (0,025мм/год), если минимальное смещение потенциала при катодной поляризации относительно потенциала коррозии (стационарного потенциала без наложенного катодного тока – 0,55 В) стали составляет 300 мВ. То есть, минимальный поляризационный (защитный) потенциал равен –0,85 В. Этот критерий принят почти во всех национальных стандартах и рекомендациях.

Стационарный потенциал сооружения, при котором ток коррозии практически равен нулю называется защитным потенциалом.

Катодная поляризация стальных подземных трубопроводов должна осуществляться таким образом, чтобы создаваемый на всей поверхности газопровода защитный потенциал был в интервале – 0,85... -1,15 В, без учета омической составляющей.

При значении защитного потенциала менее минимального происходит неполная защита сооружения, т. е. возможна коррозия.

При достижении потенциала выше максимального значения будет наблюдаться перерасход потребляемой электроэнергии, а также, что самое главное, возможно разрушение изоляции (в основном в дефектах покрытия) под действием выделяющегося газообразного водорода.

Плотность тока катодной поляризации j и электрохимический потенциал исследуемого металла U обычно связывают графической зависимостью, называемой катодной поляризационной характеристикой $U = F(j)$, вид которой определяется множеством физико-химических факторов, проявляющихся на поверхности поляризуемого электрода.

Поскольку электрохимическая защита основана на том, что сдвигая потенциал металла пропусканием внешнего тока, можно изменять скорость его коррозии. Увеличение внешнего катодного тока до величины обеспечивающей достижение равновесного потенциала полностью подавляет коррозионный процесс. Это позволяет управлять электрохимической защитой газопроводов.

На рис. 1.1.7 приведена типичная поляризационная характеристика и установка для исследования катодной поляризации. Исследуемый электрод-катод 1 подключают к минусу источника тока, плюс которого связывают с вспомогательным электродом-анодом 2. Последний располагают так, чтобы стекающий с него ток затем натекал на катод достаточно равномерно. Измерительный электрод или его зонд 3 устанавливают рядом с исследуемым электродом-катодом.

По прошествии некоторого времени, необходимого для стабилизации электрохимических процессов, измеряют стационарный потенциал исследуемого электрода $U_{ст}$, после чего, медленно или ступенями изменяя ток поляризации, снимают поляризационную кривую.

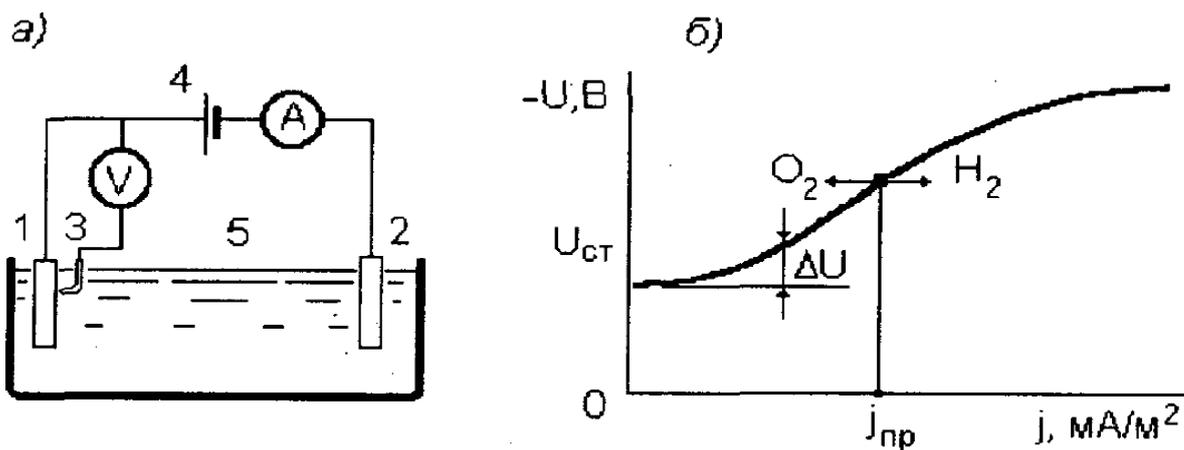


Рис.1.1.7. Установка для снятия поляризационной характеристики (а) и типичная катодная поляризационная характеристика стального электрода (б): 1 - исследуемый электрод; 2 - вспомогательный электрод-анод; 3 - измерительный электрод; 4 - источник тока; 5 - сосуд с электролитом.

Следует отметить, что катодное смещение ΔU есть отрицательное приращение потенциала электрода относительно своего стационарного состояния $U_{ст}$.

Смещение потенциала - это падение напряжения на поляризационном сопротивлении, т.е. $\Delta U = Rj$. Эта зависимость подчинялась бы закону Ома, если бы была линейной.

Поскольку рассмотренные конструктивные схемы электрохимической защиты защищаемых объектов не учитывают специфики безопасной эксплуатации газораспределительных сетей, то при обосновании конструктивных схем и параметров защиты должно быть учтено их искро-взрыво-безопасное исполнение [80, 81, 97, 98, 100].

1.2. Анализ конструктивных схем электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты

В настоящее время наиболее распространёнными электротехническими устройствами диагностики технического состояния газопроводов и электрохимической их защиты, а также переходных процессов и режимов работы являются контактные конструктивные схемы исполнения [2-4, 6, 33, 36, 37, 40, 52-56, 64-79, 82].

Их использование требует нарушения изоляции и соответствующих затрат на обеспечение указанных нарушений и в последующем ликвидации их для обеспечения соответствующей защиты от повреждений.

Одним из перспективных технико-технологичных направлений контроля технического состояния стальных газопроводов, их изоляции, электрохимической защиты и объёма газа является применение совершенствование и создание бесконтактных способов и электротехнических устройств контроля [33-35, 38, 65-79, 82, 93, 99, 104].

Выполнение контроля бесконтактным магнитометрическим методом, например, теплопроводов через слой изоляции осуществляют два специалиста. Один специалист держит прибор типа ИКН (измеритель концентрации напряжений) и наблюдает за изменением магнитного поля на экране, а другой специалист передвигает сканирующее устройство (СУ) вдоль поверхности трубопровода. В исключительных случаях контроль может выполнять один специалист, который, держа в руках прибор ИКН, одновременно передвигает СУ вдоль поверхности трубопровода. На практике такой контроль возможен, если диаметр трубопровода не превышает 500 мм.

По ходу движения вдоль трубопровода специалист, который держит в руках прибор, делает отметки в блокноте о различного рода препятствиях и помехах (опоры и подвески, изгибы трубопровода, его пересечения с

другими трубопроводами, с кабелем, наличие отводов, дренажей, арматуры и др.). Возможна запись о препятствиях и помехах в диктофон. Разбивка записанной информации по длине отдельных файлов принимается по месту, исходя из реальной трассировки трубопровода и условий доступности для контроля.

Сканирующее устройство, которое используется для контроля трубопроводов через слой изоляции, имеет 16 каналов измерений нормальной составляющей магнитного поля.

Феррозондовые датчики СУ устанавливаются на специальных дугах (рис.1.2.1).



Рис.1.2.1. Общий вид СУ для контроля труб $\varnothing 200-1420$ мм

В зависимости от диаметра трубопровода на СУ изменяются длины дуг и радиус их изгиба. При контроле охватывается только часть периметра трубы, и сканирование осуществляется вдоль поверхности, доступной для контроля.

В случае фиксирования на экране прибора магнитной аномалии с характерными параметрами для данного типоразмера трубы делается запись в блокнот, и отмечается по месту расположение этой аномалии по длине теплопровода с привязкой к номерам опор и другим узловым элементам схемы. Параметры магнитной аномалии зависят от толщины слоя изоляции, ее качества и диаметра трубопровода и указываются в методике.

В зонах выявленных магнитных аномалий рекомендуется выполнить контроль вдоль периметра трубопровода с целью определения зоны максимальной концентрации напряжений в данном сечении трубопровода, которая соответствует максимальному значению градиента магнитного поля. Контроль вдоль периметра трубы выполняется тем же прибором ИКН с использованием другого (типового) датчика (рис.1.2.2).



Рис.1.2.2. Сканирующее устройство тип 1-8М

По результатам бесконтактного (через слой изоляции) магнитометрического контроля трубопровода выполняется анализ магнитограмм и намечаются контрольные участки (два-три участка на каждые 500 м длины трубопровода) для выполнения дополнительного неразрушающего контроля другими методами (метод МПМ, ультразвук, толщинометрия, визуально-измерительный контроль, вихретоковый метод).

Рассмотрим далее отдельные результаты бесконтактного магнитометрического контроля трубопроводов горячего водоснабжения тепловой сети в городских условиях.

На рис.1.2.3 представлен пример результатов контроля на участке трубопровода $\varnothing=500\text{мм}$, расположенного в проходном коллекторе и покрытом асбестовой изоляцией толщиной $\sim 60\text{мм}$, внутри которой имеется металлическая сетка "рабица", где представлено аномальное распределение магнитного поля H_p (верхняя часть магнитограммы) и его градиента dH/dx

(нижняя часть магнитограммы), зафиксированное через слой изоляции на данном участке трубопровода, и, показано распределение магнитного поля H_p и его градиента dH/dx , зафиксированное на этом же участке после снятия изоляции при непосредственном контроле методом МПМ по поверхности трубы. В зонах локальных изменений поля и его градиента ультразвуковым методом были выявлены язвы коррозии на внутренней поверхности трубы с утонением стенки до 4-5мм вместо 8мм по номиналу.

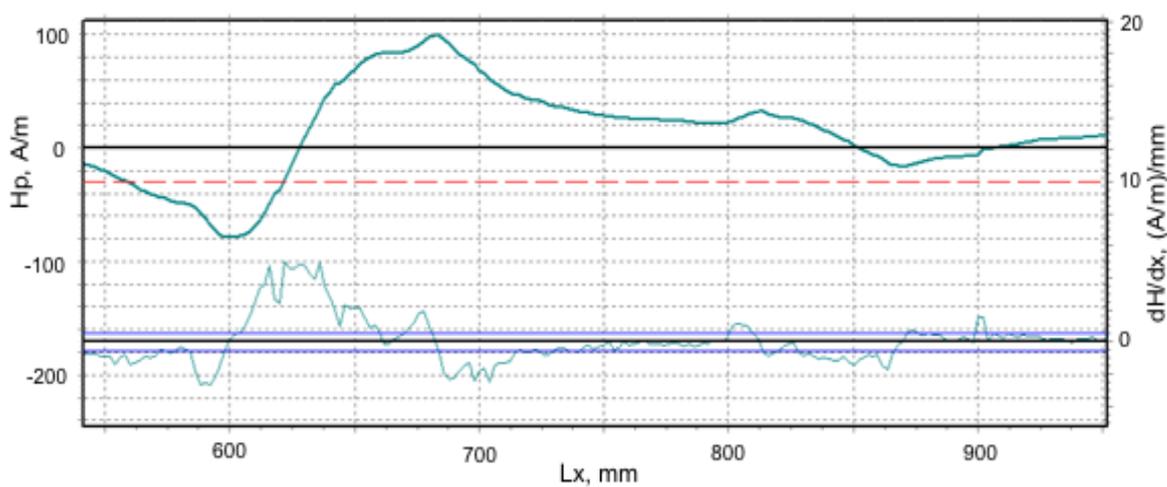


Рис.1.2.3а.

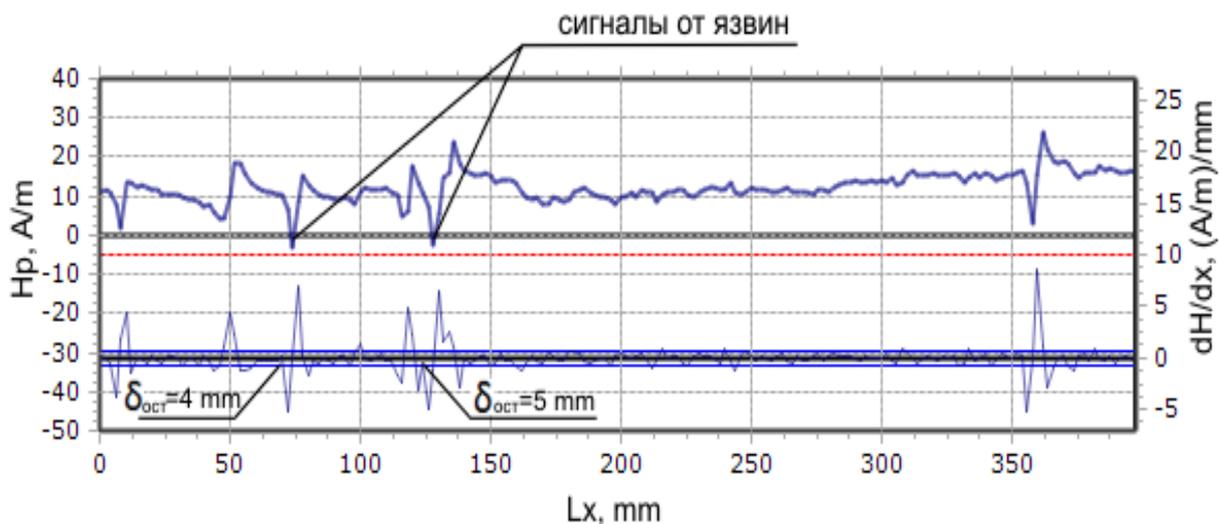


Рис.1.2.3б.

На рис.1.2.4 представлен пример результатов контроля через слой изоляции участка трубопровода $\varnothing 600 \times 8$ мм, расположенного в проходном коллекторе.

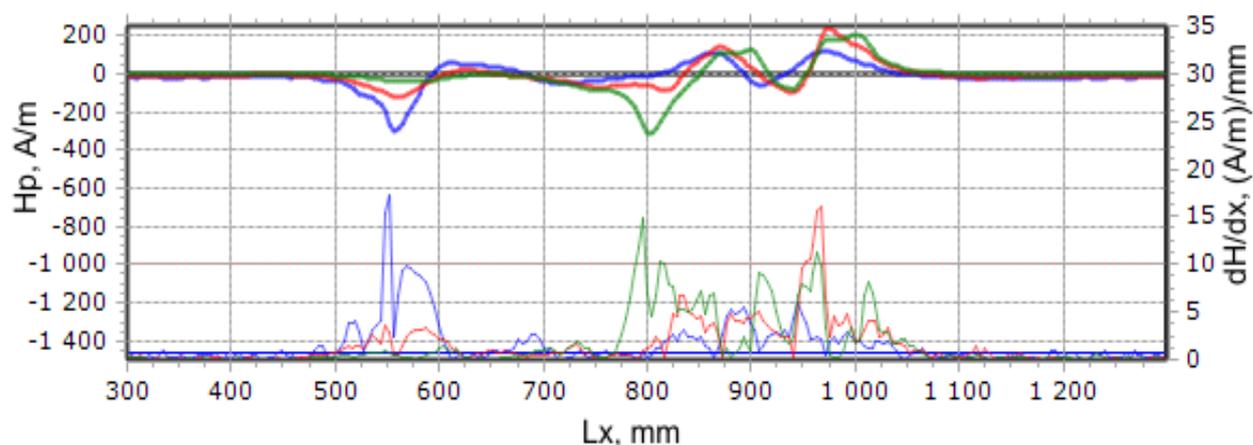


Рис.1.2.4.

На рис.1.2.4 представлено распределение магнитного поля H_p и его градиента (dH/dx), зафиксированное по трем каналам измерений через слой изоляции на участке с аномалией А1. Аналогичные изменения поля H_p и его градиента были зафиксированы в зоне А1 по всем 16-ти каналам измерений сканирующего устройства, который охватывал примерно одну треть периметра трубы, где длина участка с А1 составляет ~ 600 мм, т.е. практически равна диаметру трубы. Полученные результаты контроля свидетельствуют о том, что данный участок трубопровода работает в условиях повышенных компенсационных напряжений при температурных расширениях. После вскрытия изоляции в зоне магнитной аномалии А1 при непосредственном контроле поверхности трубы ультразвуковым методом были выявлены несколько зон локального утонения стенки (от 3,8 до 6,6 мм вместо 8 мм по номиналу) из-за внутренней коррозии.

Разработан принципиально новый подход к проведению технической диагностики трубопроводов бесконтактным магнитометрическим методом с использованием высокотехнологичного комплекса КМД-01М.

Комплекс бесконтактной магнитометрической диагностики КМД-01М состоит из следующих составных частей:

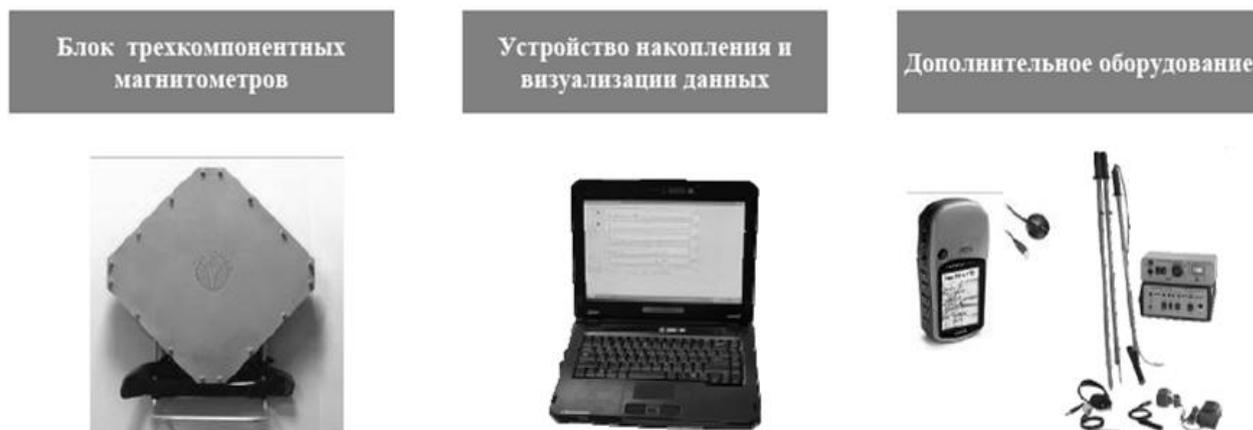


Рис.1.2.5.

Представленные примеры показывают преимущество бесконтактного магнитометрического способа выявлять на трубопроводах через слой изоляции наиболее напряженные участки, предрасположенные к развитию повреждений.

Обеспечивая контроль технического состояния изоляции и применив конструкционный материал, обладающий защитой от блуждающих токов и токов утечек, а также химической защитой, решается вопрос электрохимической защиты газопроводов. В городской черте, где увеличивается интенсивность и величина блуждающих токов и токов утечек, существуют эффективные электротехнические устройства электрохимической защиты рельсов трамвайного и железнодорожного транспорта, которые в комплексе с конструкционным материалом изоляции обладающим свойствами электрохимической защиты газопроводов, обеспечивает повышение эффективности их электрохимической защиты.

В измерительный комплекс расхода газа входит вторичный прибор, который снабжён интегратором со счётным механизмом, который измеряет не только расход газа, но также массу или объём прошедшего вещества. Наряду с этим массу и объём можно получить путём платиметрирования

обработки диаграмм записи периода давления, давления и температуры. Так как содержание газа в единице объёма зависит от давления и температуры, то результаты измерения объёмного расхода газа надо приводить к стандартным условиям [36, 37].

Анализ конструктивных схем измерительных комплексов расхода газов показал, что все измерительные элементы, входящие в его состав – контактные [36, 37].

Одним из параметров, обеспечивающим прогнозирование объёма газа и давления в газопроводе, является температура, измерение которой можно осуществить бесконтактным способом [33].

Бесконтактные измерения температуры производится с помощью инфракрасных (ИК) термометров. Достоверность результатов измерений зависит от значений коэффициента излучения поверхности (металлического трубопровода и его изоляции), который можно установить заранее экспериментально. Перед началом измерения необходимо ввести в прибор значение поправки, соответствующей свойствам их материала, и тогда прибор будет корректировать показания, компенсируя недостаточную излучающую способность.

Существуют модели ИК с лазерными прицелами, которые облегчают точное наведение объектива прибора на требуемый участок поверхности. В современных моделях используются несколько вариантов организации лазерных прицелов (рис. 1.2.6).

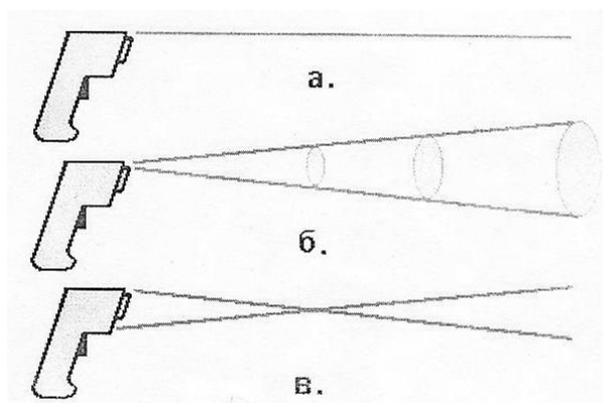


Рис. 1.2.6

Простейший случай (рис. 1.2.6.а) – один лазерный луч, показывающий на исследуемой поверхности середину (реже – верхний край) мишени. Второй вариант (рис. 1.2.6.б) – более удобный – два расходящихся луча, показывающие на изучаемой поверхности диаметр мишени. Третий вариант (рис. 1.2.6.в) – два луча, сведением которых вместе можно, например, обеспечить всегда постоянное необходимое расстояние до исследуемой поверхности. Это важно для приборов с фиксированным фокусом.

Важно помнить, что включение лазерного прицела значительно увеличивает мощность потребления прибора (примерно в 5 ... 10 раз), поэтому целесообразно отключать устройство лазерного прицела тогда, когда в его использовании нет необходимости.

Многие современные модели ИК термометров имеют полезные режимы определения максимального, минимального и среднего значений температуры, которые имели место за время эксперимента. Кроме того, есть приборы с режимами определения значений температуры, превышающих значение заданной оператором установки. Это позволяет, выполняя сканирование исследуемой поверхности, легко найти участки поверхности, с температурой, выше заданной. Аналогичным образом можно обеспечить поиск участков с температурой ниже запрограммированной установки. При этом обычно появление результатов измерения, которые выше или ниже установки (в зависимости от режима) сопровождается звуковым сигналом, дополнительно обращающим внимание на события.

ИК термометр удобно использовать в экспресс-обследованиях. Можно организовать длительную регистрацию температуры поверхности объекта с помощью ИК термометра. Некоторые модели (например, ИК термометр INFRATRACE 801 фирмы Kane-May – Великобритания) имеют выход аналогового сигнала, пропорционально текущему значению измеряемой температуры (например, 1 мВ/°С), что позволяет подключить ИК

термометр к внешнему аналоговому самопишущему прибору или к цифровому измерительному регистратору – логгеру (рис. 1.2.7).



Рис. 1.2.7

При использовании цифровых измерительных регистраторов (логгеров) возможна дальнейшая компьютерная обработка и представление данных.

Для обнаружения небольших разностей температур (например, при поиске подземных трасс), когда не требуется точного измерения собственно температур, целесообразно повысить чувствительность ИК термометра. Это достигается введением низкого значения поправки – коэффициента излучения, например, 0,2...0,4.

Необходимо помнить, что у входного датчика ИК термометра существует определенная тепловая инерционность, и может потребоваться несколько минут для установления показаний при переходе от поверхности с высокой (близкой к максимально возможной) температурой к поверхности с низкой.

Применение аналого-цифрового преобразователя в измерительном комплексе температуры (рис.1.2.7) позволит совместно с дальнейшей компьютерной обработкой обеспечить представление данных по объёму газа в газопроводах.

Из анализа физических процессов в датчике, регистрирующего изменения давления газа в газораспределительных сетях, следует, что должно быть обеспечено им преобразование давления газа в электрический

сигнал пропорциональный величине напряжения или тока и обратная связь с комбинированным регулятором давления газа типа РДНК (см 1.1).

Комбинированный регулятор давления газа РДНК-32 (рис. 1.2.8) предназначен для понижения давления с высокого или среднего на низкое, а также поддержания давления на выходе на заданном уровне, который задаётся регулировочным винтом 15. При аварийном повышении или понижении выходного давления сверх допустимых значений происходит автоматическое отключение подачи газа.

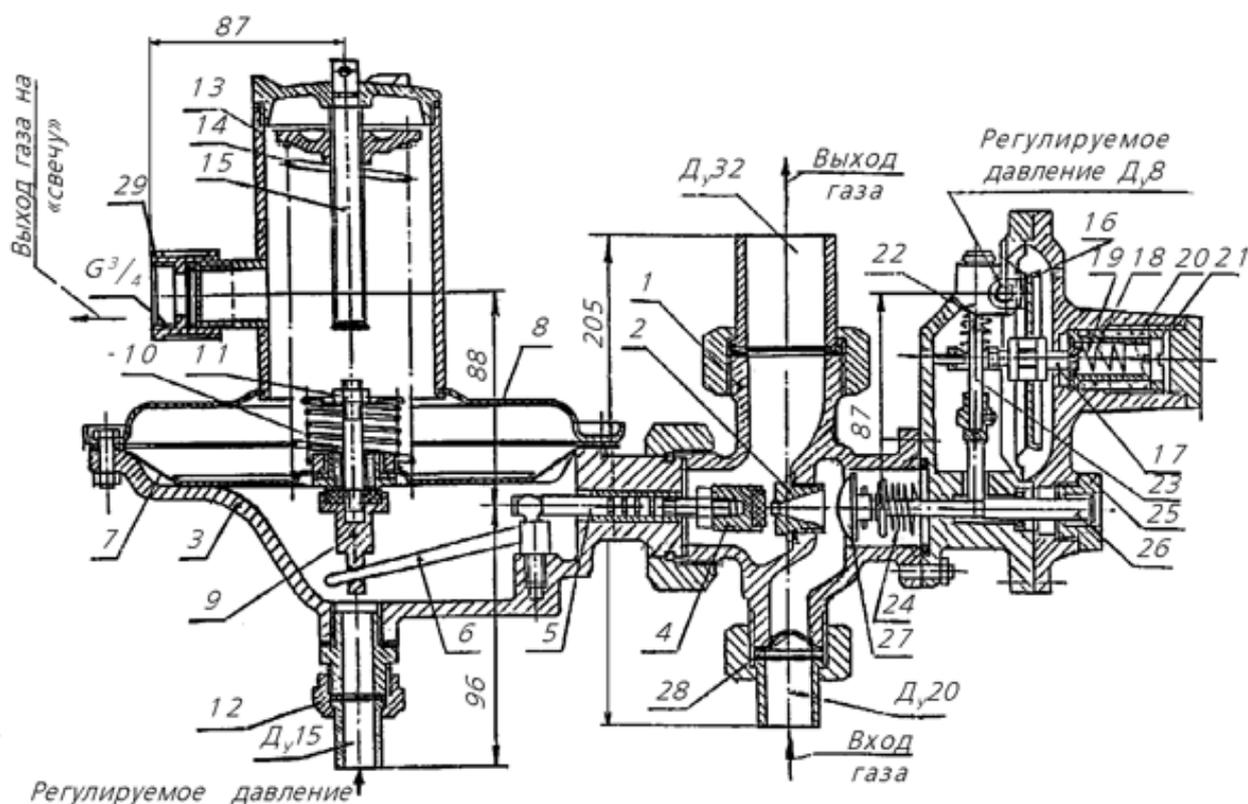


Рис. 1.2.8. Регулятор давления газа комбинированный РДНК-32:

1 — крестовина; 2 — седло; 3 — корпус; 4 — клапан; 5 — шток; 6 — рычаг; 7 — мембрана регулятора; 8 — крышка; 9 — клапан сбросной предохранительный; 10 — пружина; 11 — гайка; 12 — ниппель; 13 — стакан; 14 — пружина; 15 — винт регулировочный; 16 — мембрана; 17 — толкатель; 18, 19 — пружина; 20 — пробка; 21 — втулка; 22 — пружина; 23 — шток; 24 — пружина; 25 — пробка; 26 — шток; 27 — клапан отсечной; 28 — защитная сетка; 29 — муфта

Газ среднего или высокого давления, поступающий в РДНК-32, проходит через входной патрубок 30, затем, минуя просвет между рабочим клапаном 12 и седлом 13, редуцируется до низкого давления и по выходному патрубку 14 подается в трубопровод на выходе из регулятора. Из выходного трубопровода импульс выходного давления поступает в подмембранную полость регулятора РДНК-32, которая соединена с подмембранной полостью отключающего устройства.

В случае колебаний выходного давления с отклонением от заданных параметров настройки отключающего устройства фиксатор 15 усилием на мембране 18 выводится из зацепления, и клапан 28 под действием пружины 27 перекрывает седло 12. В результате поступление газа прекращается.

Повторный пуск регулятора РДНК-32 производится вручную после устранения причин срабатывания отключающего устройства.

Отсутствие электропривода для управления регулировочным винтом 15 снижает возможность использования регулятора типа РДНК в балансировке газораспределительных сетей. Применение искро- взрыво безопасного безредукторного реактивно-вентильного электродвигателя, вал которого будет жёстко связан с валом регулировочного винта 15 обеспечит автоматический режим балансировки газораспределительных сетей. Причём, реактивно-вентильный электродвигатель технологично вписывается в конструкцию комбинированного регулятора давления газа типа РДНК, обеспечивая при этом требуемый уровень позиционирования регулировочного винта 15, а следовательно и регулирования давления в газопроводах[104, 105].

Таким образом, формируется электромеханическая система регулирования давления газа в газопроводах, обеспечивающая балансировку газораспределительных сетей, включающей конструкции общеизвестных датчиков давления газа[105].

1.3. Цель и задачи исследования

В результате анализа и проведённого исследования электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, обеспечивающих требуемый уровень эффективности их функционирования сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Целью данной работы является повышение эффективности функционирования электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей путем обоснования рациональной структуры их функциональных связей, параметров и закономерностей формирования управляющих воздействий, обеспечивающих требуемый уровень надёжности, гибкости управления режимами работы и электрохимической защиты газопроводов.

Для достижения поставленной цели сформированы и решены следующие задачи исследования.

8. Анализ конструктивных схем, методов расчёта параметров и надёжности электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей и условий их эксплуатации.
9. Определение функциональных связей электротехнических и электромеханических устройств систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, учитывающих в комплексе закономерности формирования режимных параметров и характеристик технического состояния газопроводов.
10. Разработка математической модели формирования топологии и управляющих воздействий в электротехнических и электромеханических системах балансировки и электрохимической

защиты газораспределительных сетей, обеспечивающих требуемый уровень надёжности и эффективности их функционирования.

11. Обоснование рациональных параметров электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей для формирования требуемого уровня надёжности режимов работы и характеристик технического состояния газопроводов.
12. Определение условий реализуемости конструкционной и функциональной надёжности электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, обеспечивающих рациональные режимы работы газопроводов и их техническое состояние.
13. Разработка методика определения рациональных параметров электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, структуры и топологии управления режимами работы газопроводов.
14. Численные и экспериментальные исследования режимов работы электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей при применении разработанных новых технических решений по управлению переходными процессами при эксплуатации.

1.4. Выводы

1. Применение электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты должно быть обеспечено путём комплексной диагностики их технического состояния, переходных процессов и режимных параметров.

2. Конструктивные схемы и параметры электротехнических и электромеханических устройств контроля технического состояния, переходных процессов и режимных параметров газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов комплексной системы диагностики должны учитывать физические процессы и их изменения и обеспечивать требуемый уровень чувствительности и разрешающей способности.

3. Определить функциональные связи электротехнических и электромеханических устройств систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, учитывающих в комплексе закономерности формирования их режимных параметров и характеристик технического состояния.

4. Разработать математическую модель формирования топологии и управляющих воздействий в электротехнических и электромеханических системах балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей на основе комплексной структуры диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, обеспечивающих требуемый уровень надёжности и эффективности функционирования систем и сетей, и, искро-взрывобезопасного исполнения конструктивных схем.

5. Обосновать рациональные параметры электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей для формирования требуемого уровня надёжности режимов работы и характеристик технического состояния газопроводов.

6. Установить условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, обеспечивающих рациональные режимы работы систем и сетей, и, их технического состояния.

7. Разработать методики определения рациональных параметров электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, структуры и топологии управления режимами работы газопроводов.

8. Численные и экспериментальные исследования режимов работы электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей при применении разработанных новых технических решений по управлению переходными процессами при эксплуатации.

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И УРОВНЯ НАДЁЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ БАЛАНСИРОВКИ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

2.1. Разработка структуры функциональных связей в электротехнических и электромеханических системах балансировки и электрохимической защиты

Повышение эффективности функционирования как электротехнических устройств, так и систем контроля, диагностики и управления позволяет использование информационной, структурной и временной избыточностей (см. 1.1).

При этом вероятность снижения эффективности функционирования как электротехнических устройств контроля и управления, так и систем контроля и управления уменьшается на величину

$$\Delta \bar{P}_{\text{си}} = \sum_{i=1}^n \bar{P}_i \int_{\bar{\theta}_{\text{си}}}^{\infty} \beta_i(\theta) d\theta = \sum_{i=1}^n \bar{\theta}_i \bar{\mu}_i \int_{\bar{\theta}_{\text{си}}}^{\infty} \beta_i(\theta) d\theta. \quad (2.1.1)$$

Конструируемые и регулируемые параметры как электротехнических устройств контроля и управления, так и систем контроля и управления будет

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{\text{си}} &= \bar{\mu} \bar{\theta} \int_0^{\bar{\theta}_{\text{си}}} \beta_i(\theta) d\theta; \quad \bar{\theta}_{\text{си}} = \bar{\theta} \int_0^{\bar{\theta}_{\text{си}}} \beta_i(\theta) d\theta; \\ P_{\text{си}} &= 1 - \bar{\mu} \bar{\theta} \int_0^{\bar{\theta}_{\text{си}}} \beta_i(\theta) d\theta; \quad \bar{\tau}_{\text{си}} = (\bar{\mu})^{-1} - \bar{\theta} \int_0^{\bar{\theta}_{\text{си}}} \beta_i(\theta) d\theta. \end{aligned} \right\} \quad (2.1.2)$$

В формулах (2.1.2) интеграл $\int_0^{\bar{\theta}_{\text{си}}} \beta(\theta) d\theta = S_{\text{си}}$ показывает на сколько ослабеваает связь между эффективностью функционирования элементов и

системы в целом. Она зависит от времени перехода вход-выход $\theta_{\text{сн}}$ и функции распределения его длительности $\beta(\theta)d\theta$. От функции распределения зависит сложность расчётов. Одновременно со структурной избыточностью при определении эффективности функционирования элементов и системы в целом, обеспечивающей требуемый уровень достоверности измеряемых контролируемых параметров и управляющих воздействий применяются информационные и временные избыточности, где $\int_{\delta}^{\infty} \beta(\theta)d\theta = S_{\text{вн}}$ - отображает степень взаимосвязи между контролируемыми параметрами и управляющими воздействиями при временной избыточности. Информационная избыточность позволяет управлять процессом влияния структурного и временного резервирования на эффективность функционирования элементов, и, измерительной и управляющей систем в целом. Надёжность уровня функционирования систем контроля и управления может быть повышена за счёт использования избыточности, которая определяется $k_{\text{ГН}}$ - коэффициентом готовности исходя из структуры взаимоувязанных элементов и систем контроля и управления

$$k_{\text{ГН}} = \frac{q_{\text{н}}}{q_{\text{н}} + \lambda_{\text{н}} t_{\text{дп}}}, \quad (2.1.3)$$

где $q_{\text{н}}$ - требуемый уровень надёжности определяемый допустимой величиной длительности перехода вход-выход; $t_{\text{дп}}$ - допустимое время простоя, определяемое допустимой длительностью переходного процесса вход-выход

Поскольку формирование управляющих воздействий распределением контролируемых параметров и эффективностью использования электротехнических устройств контроля и управления устанавливаемое на основе нейронной сети выполняет функцию модели измеряемых и управляемых потоков, а также реакции его на изменение состояния анализирующих элементов и измеряемых и управляющих систем при

известных контролируемых параметрах, позволяет получить цифровую модель указанных потоков.

На основании анализа использования нейронной сети с применением соответствующего математического аппарата осуществляется моделирование режимов работы конструктивных схем контроля и управления (см. 1.1) [29, 31, 32, 104, 105].

В качестве нейронной сети в данном случае может быть выбрана адаптивная сеть нечеткого вывода (ANFIS), которая позволяет использовать при своем обучении, не только статистическую информацию, но и качественную информацию о поведении моделируемой системы, представленной в виде нечетких продукционных правил Такаги-Сугено, и кроме того может быть достаточно просто реализована и обучена в системе MATLAB.

ANFIS - это аббревиатура Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System - адаптивная сеть нечеткого вывода, предложенной Янгом. Архитектура данной нейро-нечеткой сети изоморфна нечеткой базе знаний.

ANFIS реализует систему нечеткого вывода Сугено в виде пятислойной нейронной сети прямого распространения сигнала. Назначение слоев следующее:

первый слой - термы входных переменных;

второй слой - antecedentes (посылки) нечетких правил;

третий слой - нормализация степеней выполнения правил;

четвертый слой - заключения правил;

пятый слой - агрегирование результата, полученного по различным правилам.

Входы сети в отдельный слой не выделяются. На рис. 2 изображена ANFIS-сеть с двумя входными переменными (x_1 и x_2) и четырьмя нечеткими правилами. Для лингвистической оценки входной переменной x_1 используется 3 термина, для переменной x_2 - 2 термина.

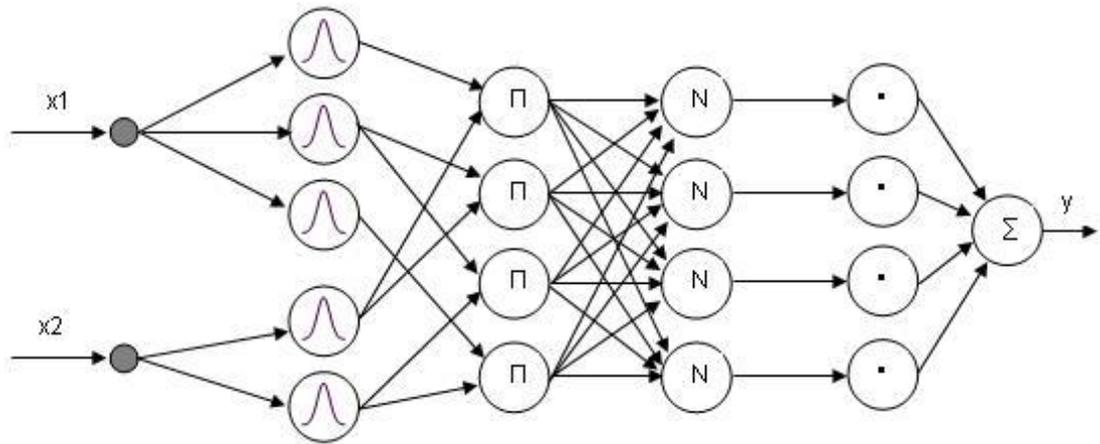


Рис. 2.1.1. Пример ANFIS-сети

Пусть: x_1, \dots, x_n - входы сети; y - выход сети;

R_r : «Если $x_1 = a_{1,r}$ и...и $x_{n,r} = a_{n,r}$, то $y = b_{0,r} + b_{1,r}x_1 + \dots + b_{n,r}x_n$ » - нечеткое правило Такаги-Сугено с порядковым номером r ; m -количество правил, $r = 1, \dots, m$; $a_{i,r}$ - нечеткий терм с функцией принадлежности $\mu_r(i)$, применяемый для лингвистической оценки переменной x_i в r -ом правиле ($r = 1, \dots, m, i = 1, \dots, n$); $b_{q,r}$ - действительные числа в заключении r -го правила ($r = 1, \dots, m; i = 0, \dots, n$).

ANFIS-сеть функционирует следующим образом.

Слой 1. Каждый узел первого слоя представляет один терм с колокообразной функцией принадлежности. Входы сети x_1, \dots, x_n соединены только со своими термами. Количество узлов первого слоя равно сумме мощностей терм-множеств входных переменных. Выходом узла являются степень принадлежности значения входной переменной соответствующему нечеткому терму:

$$\mu_r(x_i) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_i - c}{a} \right|^{2b}}, \quad (2.1.4)$$

где a , b и c - настраиваемые параметры функции принадлежности.

Слой2.Количество узлов второго слоя равно m . Каждый узел этого слоя соответствует одному нечеткому правилу. Узел второго слоя соединен с теми узлами первого слоя, которые формируют antecedentes соответствующего правила. Следовательно, каждый узел второго слоя может принимать от 1 до n входных сигналов. Выходом узла является степень выполнения правила, которая рассчитывается как произведение входных сигналов. Обозначим выходы узлов этого слоя через $\tau_r, r = 1, \dots, m$.

Слой3.Количество узлов третьего слоя также равно m . Каждый узел этого слоя рассчитывает относительную степень выполнения нечеткого правила:

$$\tau_r^* = \frac{\tau_r}{\sum_{j=1}^m \tau_j}. \quad (2.1.5)$$

Слой4.Количество узлов четвертого слоя также равно m . Каждый узел соединен с одним узлом третьего слоя, а также со всеми входами сети. Узел четвертого слоя рассчитывает вклад одного нечеткого правила в выход сети:

$$y_r = \tau_r^* (b_{0,r} + b_{1,r}x_1 + \dots + b_{n,r}x_n). \quad (2.1.6)$$

Слой5.Единственный узел этого слоя суммирует вклады всех правил:

$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_m. \quad (2.1.7)$$

Типовые процедуры обучения нейронных сетей могут быть применены для настройки ANFIS-сети так как, в ней использует только дифференцируемые функции. Обычно применяется комбинация градиентного спуска в виде алгоритма обратного распространения ошибки и метода наименьших квадратов. Алгоритм обратного распространения ошибки настраивает параметры antecedentes правил, т.е. функций

принадлежности. Методом наименьших квадратов оцениваются коэффициенты заключений правил, так как они линейно связаны с выходом сети. Каждая итерация процедуры настройки выполняется в два этапа. На первом этапе на входы подается обучающая выборка, и по невязке между желаемым и действительным поведением сети итерационным методом наименьших квадратов находятся оптимальные параметры узлов четвертого слоя. На втором этапе остаточная невязка передается с выхода сети на входы, и методом обратного распространения ошибки модифицируются параметры узлов первого слоя. При этом найденные на первом этапе коэффициенты заключений правил не изменяются. Итерационная процедура настройки продолжается пока невязка превышает заранее установленное значение.

Таким образом, предложена методология формирования топологии и структуры системы измерений контролируемых параметров и управляющих воздействий для эффективного функционирования газопроводов, опирающаяся на методы системного подхода теорий линейных систем, надёжности нейтральных сетей и избыточностей. Предложенная методология позволяет установить АФ – аппаратную функцию электротехнических устройств контроля технического состояния газопроводов и эффективные режимы их работы и управления ими.

На основании анализа использования нейронной сети с применением разработанного математического аппарата проведено моделирование режимов работы электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, и, системы их диагностики в комплексе с использованием приложения MatLab SimPowerSystems.

На рис. 2.1.2 изображена структура измерительно-информационно-управляющего модуля – ИИУМ, который включает датчики измеряемых параметров системы диагностики $D_1 \dots D_N$, коммутатор K , через который

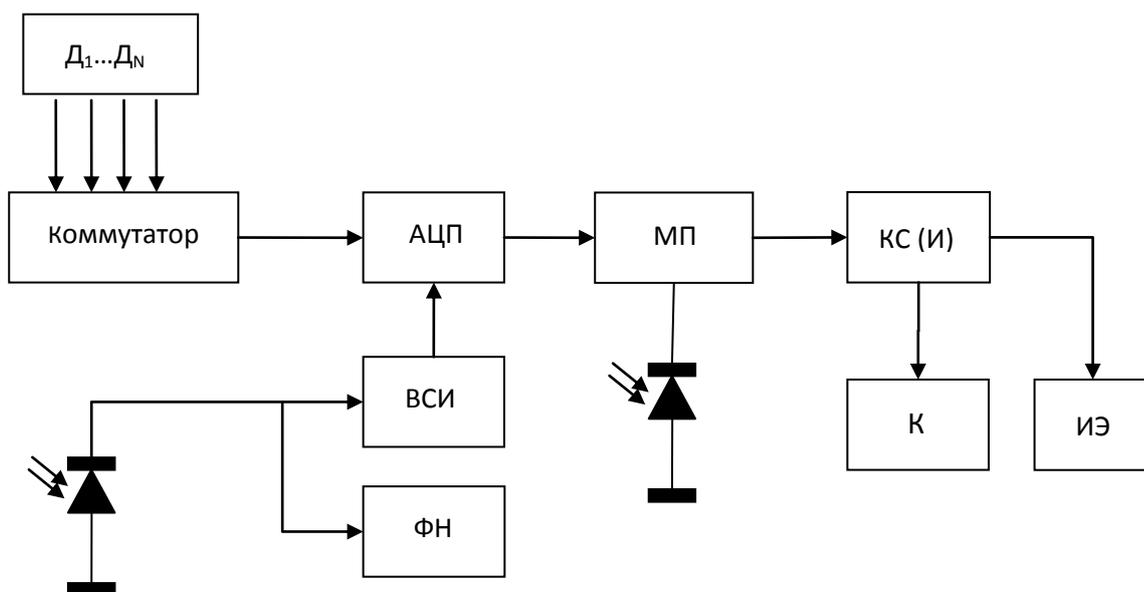


Рис. 2.1.2. Структура измерительно-информационного-управляющего модуля

датчики подключены к аналогово-цифровому преобразователю АЦП, источник системы питания, узел формирования напряжения ФН, который вырабатывает ряд напряжений, необходимых для работы узлов ИИУМ и может модулировать синхроимпульсы ВСИ для запуска АЦП и синхронизации работы нескольких ИИУМ расположенных в различных частях контролируемых объектов газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов. Внутренний генератор ИИУМ формирует токовые импульсы, которые задают скорость выдачи последовательного кода с выхода АЦП. М – микропроцессор с устройством кодирования УК преобразует двоичный последовательный код с выхода АЦП в сигнал, в котором «0» и «1» представлены импульсами разной длительности. Способ кодирования и его реализация представлены на рис.2.1.3. КС – канал связи (интерфейс) и компьютер К, где происходит визуализация, результаты обработки поступающей информации, и, в комплексе реализуются системы диагностики и формирование управляющих воздействий на исполнительные элементы ИЭ систем управления режимами

работы электротехническими и электромеханическими устройствами балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, и, переходными процессами систем и сетей.

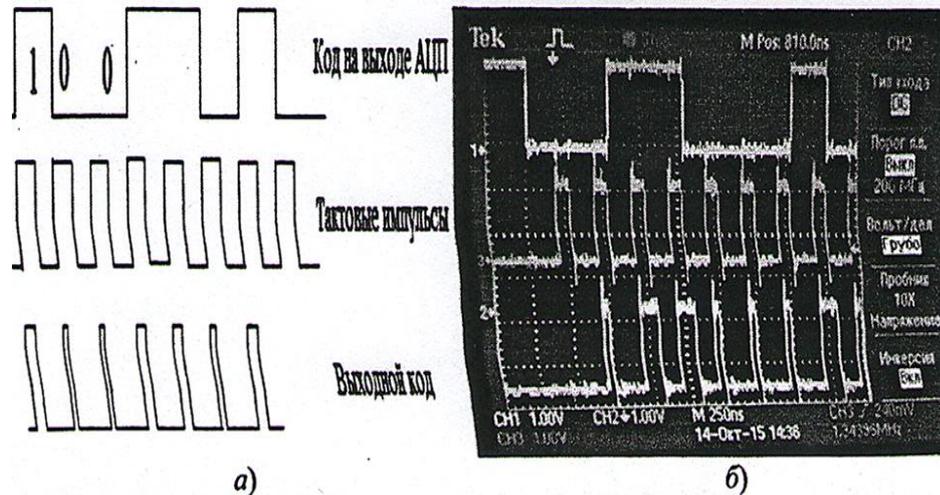


Рис. 2.1.3. Способ кодирования (а) и его реализация(б)

Рациональная структура функциональных связей конструктивной схемы (рис.2.1.2 и рис.2.1.3) обеспечивают в комплексе требуемый уровень эффективности функционирования систем диагностики, электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов.

2.2. Определение уровня надёжности и условий реализуемости электротехнических и электромеханических систем

Процесс формирования текущих значений соотношений напряжённо-деформированного состояния стенок труб с пределами прочности и текучести трубкой стали отражают скорость образования локальных концентраторов напряжений и условий допустимой остаточной толщины стенки стальных газопроводов, на которые оказывают влияние в комплексе показатели эффективности диагностики технического состояния

электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и эффективности их работы, регулирование давления в газопроводах и снижение образования в них коррозионных дефектов.

С учётом данных показателей качества диагностики и эффективности работы электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов коэффициент технического уровня можно выразить следующей зависимостью

$$k_y = \frac{1}{5} \left(\frac{V_{Kc}}{V_{Kn}} + \frac{V_{OTc}}{V_{OTn}} + \frac{N_{Pc}}{N_{Pn}} + \frac{\Delta P_{Oc}}{\Delta P_{On}} + \frac{N_{OKc}}{N_{OKn}} \right), \quad (2.2.1)$$

где V_{Kc} и V_{Kn} - скорость образования концентраторов напряжений в существующих системах(с) и нового технического уровня(н); V_{OTc} и V_{OTn} - скорость изменения остаточной толщины трубы газопроводов; N_{Pc} и N_{Pn} - число диагностированных оценок; ΔP_{Oc} и ΔP_{On} - отклонения регулируемой величины давления от требуемого уровня; N_{OKc} и N_{OKn} - число зон образования коррозионных участков.

Конструктивные элементы системы распределения электрической энергии работают в условиях циклической переменной нагрузки, разрушение которых происходит при равенстве произведенной внутренней работы [29,30, 104, 105]

$$A = k_N \Delta A \quad (2.2.2)$$

где k_N – число циклов коммутации электротехнических устройств перераспределения электрической энергии; ΔA – внутренняя работа, совершаемая за один цикл коммутации.

Вероятность безотказной работы зависит от величины остаточного запаса энергии A_{O3} , который можно еще израсходовать при периодических нагрузках

$$P(N) = \frac{A_{O3}}{A} = \frac{A - k_N \Delta A}{A} \quad (2.2.3)$$

подставляя значение из (2.2.3) получаем

$$k_{II} k_N \Delta A \leq A \quad (2.2.4)$$

где k_{II} – коэффициент перегрузки, учитывающий изменение нагрузки

Внутренняя работа ΔA может быть выражена как

$$\Delta A = \pi \frac{F_{\partial}^2}{E} \quad (2.2.5)$$

где E – модуль деформации; F_{∂} – действующая на элементы конструкции устройств коммутации нагрузка, которая может быть выражена как

$$F_{\partial} \leq \frac{k_m k_o F_H}{k_{II}} \quad (2.2.6)$$

где k_m – коэффициент условий работы, учитывающий изменение нагрузки; k_o – коэффициент однородности конструкционных материалов, учитывающий изменение его механических свойств; F_H – нормативная нагрузка на элементы конструкции устройств коммутации и системы распределения электрической энергии.

Подставляя 2.2.5 в 2.2.2 получим

$$A = k_N \pi \frac{F_{\partial}^2}{E} \quad (2.2.7)$$

Подставляя 2.2.6, 2.2.5 и 2.2.4 в 2.2.3 получим

$$\frac{k_{\Pi}^3}{k_m^2 k_o^2} F_{\partial}^2 \leq F_H^2 \quad (2.2.8)$$

где

$$k_{\Pi} = \frac{F_{\partial H}}{m_{F\partial}} \quad (2.2.9)$$

$F_{\partial H}$ – наибольшее значение действующей нагрузки; $m_{F\partial}$ – математическое ожидание случайных величин действующих нагрузок, равное средней величине $F_{\partial ср}$;

$$k_m = 1 - P_{ук}(t) \quad (2.2.10)$$

Коэффициент запаса по конструкционному материалу при этом можно выразить как:

$$K_H = \frac{k_{\Pi}^3}{k_m^2 k_o^2} \quad (2.2.11)$$

Учитывая, что

$$k_{N_H} = \frac{1}{\lambda_{HM}} \quad (2.2.12)$$

имеем с учетом 2.2.7

$$A_{H_{H\delta}} = \frac{\pi F_{\delta}^2}{\lambda_{HM} E} \quad (2.2.13)$$

$$m_{A_H} = \frac{\pi m_{F_{\delta}}}{\lambda_{HM} E} \quad (2.2.14)$$

а

$$K_H = \frac{A_{H_{H\delta}}}{m_{A_H}} \quad (2.2.15)$$

Тогда из зависимости 2.2.11 получим

$$k_o = \sqrt{\frac{K_H k_m^2}{k_{\Pi}^3}} \quad (2.2.16)$$

Установлено, что случайная величина действующей нагрузки в устройствах контроля и управления подчиняются нормальному закону распределения.

Для законов распределения случайных величин нагрузок имеем равенство

$$P_{HM}(F_H > m_{F_{\delta}}) = 1 - q_{HM} \quad (2.2.17)$$

На основании которого, в общем случае

$$F_H = K_H \cdot F_{\sigma_{H\delta}} \quad (2.2.18)$$

Условием реализуемости надёжности в этом случае является неравенство 2.2.8 . Из диаграммы нагрузки по A и k_0 , и K_H выбирается конструкционный материал для устройств коммутации.

Поскольку $k \cdot N_H$ получается путём периодической нагрузки с частотой f_N , то срок службы t_N может быть выражен из следующего равенства

$$\ln F_{\sigma_{H\delta}} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{A_{H\delta} E}{\pi} \right) - \frac{1}{2} \ln t_N - \frac{1}{2} \ln t_{HM} \quad (2.2.19)$$

$$f_N = \frac{1}{q_{HM}} \quad (2.2.20)$$

решая 2.2.19 относительно t_N с учётом

$$q_{HM} = \frac{\pi \cdot F_{\sigma_{H\delta}}^2}{A_{H\delta} E} \cdot f_N \cdot t_N \quad (2.2.21)$$

получим

$$t_N = \frac{t_{HM}}{q_{HM}} \quad (2.2.22)$$

Зависимости 2.2.2 – 2.2.22 устанавливают условия реализуемости надёжности устройств контроля и управления.

Условие реализуемости надёжности элементов устройств контроля и управления, определяемое соответствием их параметров условиям эксплуатации, выражается как

$$P_{Y_T}(t) \leq q_{HM} \quad (2.2.23)$$

тогда

$$\frac{t_{\partial\Pi} T_{OC}}{T_{OH}^2} \leq q_{HM} \quad (2.2.24)$$

Исходя из неравенств 2.2.21 и 2.2.22, функциональные параметры устройств коммутации и контроля качества электрической энергии определяется на основе их соответствия условиям эксплуатации и обеспечения требуемой величины T_{OH} .

$$q_{HM} = \left(\frac{k_y c_c q_c^{ky}}{C_{y_n}} \right)^{\frac{1}{ky+1}}, \quad (2.2.25)$$

где C – затраты на обеспечение надёжности устройств коммутации и контроля качества электрической энергии; $C_{уд}$ – допустимые затраты (потери - ущерб) от отказа устройств коммутации и контроля качества электрической энергии;

$$C_{уд_n} = C_{дн_n} t_{\partial\Pi}, \quad (2.2.26)$$

где $C_{дн}$ – допустимые затраты в единицу времени от отказа устройств коммутации и контроля качества электрической энергии;

$$C_{\partial\Pi_H} = \frac{C_{\partial\Pi_C}}{k_y}, \quad (2.2.27)$$

Выражение 2.2.25 может быть прологарифмировано и решая уравнение относительно $C_{удн}$, получим

$$C_{y\partial_n} = \frac{k_y c_c q_c^{k_y}}{q_{HM}^{k_y+1}}, \quad (2.2.28)$$

тогда из 2.2.26

$$t_{\partial_n} = \frac{C_{y\partial_n}}{C_{\partial n_n}}, \quad (2.2.29)$$

Используя отношение 2.2.29, могут быть определены значения T_{HM} , P_{HM} и V_{HM} .

2.3. Расчёт показателей надёжности и режимных параметров эффективного функционирования электротехнических и электромеханических систем

На основе анализа результатов исследования моделирования переходных процессов и их обобщения определены данные для расчета показателей надёжности.

Для определения показателей надёжности использовались зависимости (2.2.1) – (2.2.30)

На основе прежних неравенств, функциональные параметры элементов системы определяются на основе их соответствия условиям эксплуатации и обеспечения требуемой величины T_{OH}

$$q_{HM} = \left(\frac{k_y C_c q_c^{k_y}}{C_{y\partial_H}} \right)^{\frac{1}{k_y+1}}, \quad (2.3.1)$$

где C_c – затраты на обеспечение надёжности элементов системы;
 $C_{y\partial_H}$ – допустимые затраты (потери-ущерб) от отказа элементов системы;

$$C_{y\partial_H} = C_{\partial_{n_H}} t_{\partial_{П}}, \quad (2.3.2)$$

где $C_{\partial_{n_H}}$ – допустимые затраты в единицу времени от отказа элементов системы;

$$C_{\partial_{П_H}} = \frac{C_{\partial_{П_C}}}{k_y}, \quad (2.3.3)$$

Логарифмируя и решая уравнение относительно $C_{y\partial_H}$, получим

$$C_{y\partial_H} = \frac{k_y C_c q_c^{k_y}}{q_{HM}^{k_y+1}}, \quad (2.3.4)$$

тогда

$$t_{\partial_n} = \frac{C_{y\partial_H}}{C_{\partial_{n_H}}}, \quad (2.3.5)$$

Используя это отношение, определяются значения T_{HM} по $k_{ТИ_{HM}}$, $P_{HM}(V)$ и $V_{HM}(t_{\partial_n})$.

С учетом условия

$$T_{он} \leq T_{ом}. \quad (2.3.6)$$

где $T_{ом}$ – максимальное время до проведения ремонтных работ;

Результаты расчета приведены в таблице 2.3.1.

Величина k_0 и K_n определяют запас по прочности и твердости конструкционного материала, которые ограничивают интенсивность износа.

Таблица 2.3.1

Показатель надежности	q_{HM}	P_{HM}	$\lambda_{HM}, 1/ч$	$t_{HM}, ч$	$T_{OHM}, ч$	$t_{ДП}, ч$
электромеханические элементы	0,0061	0,9953	0,0035	17,38	500,58	1,52
электротехнические элементы	0,0078	0,9975	0,0028	18,36	626	1,75

Показатель надежности	$k_{ТИHM}$	$P_y(t)$	$k_{П}$	K_H	k_m	K_0	$t_{МП}$	k_{MM}
электромеханические элементы	0,976	0,03	1,47	1,53	0,995	0,66	280,6	13
электротехнические элементы	0,98	0,007	1,85	1,99	0,995	0,67	255,4	15

Характер изменения $q_{HM} = f(k_y)$, $t_{ДП} = f(k_y)$ и $T_{OHM} = f(q_{HM})$ имеет следующий вид (рис. 2.3.1.), где Γ – электромеханические элементы; ε – электротехнические элементы.

Зависимость показателей надежности q_{HM} , $t_{ДП}$, T_{OHM} получена качественная картина требуемых их изменений с учетом зависимости плотности вероятности длительности совпадений характеристик негативных факторов, снижающих эффективность использования электротехнических и электромеханических элементов рис. 2.3.1.

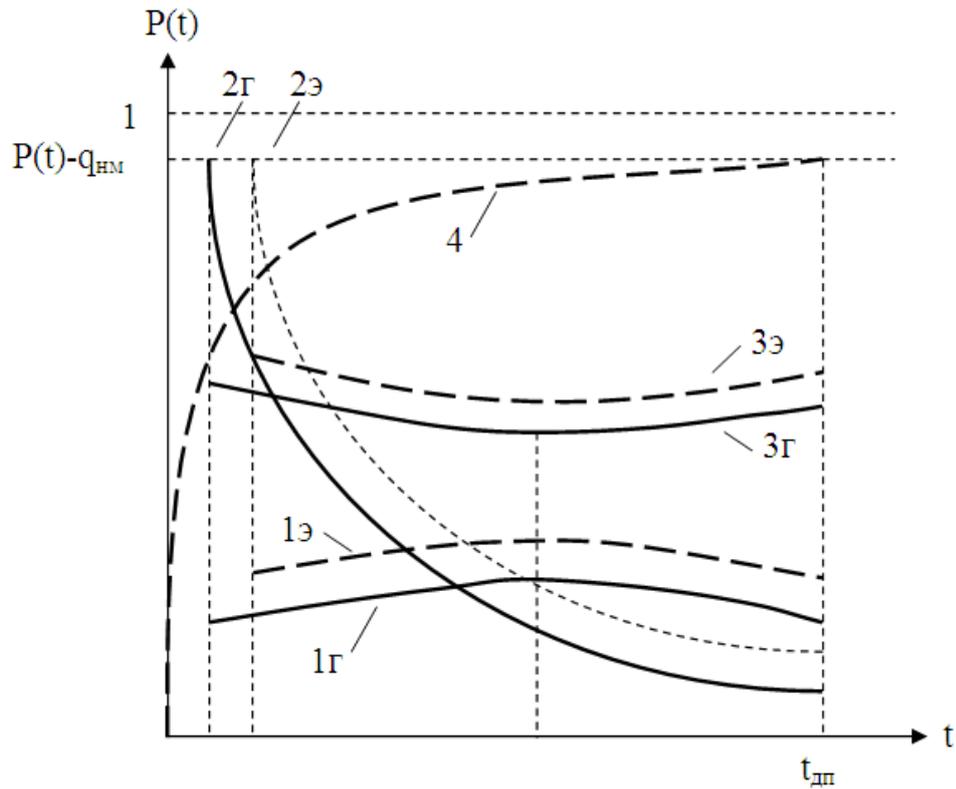


Рис. 2.3.1. $1 - q_{HM} = f(ky)$; $2 - t_{дп} = f(ky)$; $3 - T_{OHM} = f(q_{HM})$;

4 – совпадение большого числа негативных факторов

Из рис. 2.3.1 следует, что в точках пересечения определяются требуемые значения показателей надежности.

2.4. Выводы

1. Определены закономерности формирования топологии, диагностики и управляющих воздействий электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, а также условий реализуемости для расчёта их параметров, обеспечения требуемого уровня формирования режимов работы и переходных процессов в системах и сетях.

2. Определены зависимости для расчёта уровня показателей надёжности электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов в комплексе на основе функциональной связи с коэффициентом их технического уровня, учитывающим эффективность функционирования систем и сетей.

3. Определены показатели надёжности, соответствующие её уровню: вероятность безотказной работы $P_{НМ}$, время безотказной работы $T_{НМ}$; интенсивность отказов $\lambda_{НМ}$; среднее время наработки на отказ $T_{ОНМ}$; время восстановления $T_{ВНМ}$; вероятность безотказной работы с учётом восстанавливаемости $P_{НМ(V)}$; экономический показатель надёжности $k_{ПНМ}$; коэффициент эксплуатационных издержек $k_{ИЗНМ}$.

4. Получены условия реализуемости надёжности, определяемые свойствами и условиями работы конструкционных материалов электротехнических устройств контроля и управления в комплексе и соответствием их функциональных параметров условиям эксплуатации.

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ БАЛАНСИРОВКИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ И ИХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

3.1. Разработка новых технических решений для повышения эффективности функционирования электротехнических и электромеханических систем

На основе анализа конструктивных схем электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, физических процессов и их характеристик установлено, что комплексную систему контроля и управления составляют три основных модуля: система диагностики, базирующаяся на устройстве контроля технического состояния и режимных параметров газопроводов; система балансировки газораспределительных сетей, базирующаяся на устройстве регулирования давления газа в газопроводе; система электрохимической защиты газораспределительных сетей, базирующаяся на устройстве управления электрохимической защитой газопроводов; система функциональных связей диагностики и формирования управляющих воздействий для эффективного функционирования газораспределительных сетей и их электрохимической защиты, обеспечивающих требуемый уровень их срока службы (см. 1.1 и 1.2).

Устройство контроля технического состояния и режимных параметров газопроводов относится к электротехническим системам, позволяющим производить регистрацию переходных процессов, происходящих в газопроводах распределительных сетей, и, текущие значения напряжённно-деформированного состояния газопроводов, а также

формировать управляющие воздействия для регулирования их режимов работы.

Задачей предложенного технического решения является расширение технологических возможностей и точности измерения режимных параметров в газопроводах распределительных сетей, и, формирование управляющих воздействий для их регулирования.

Поставленная задача достигается тем, что в устройство контроля технического состояния и режимных параметров газопроводов состоящем из последовательно соединенных датчика контроля температуры, связанного с аналого-цифровым преобразователем, интерфейса и компьютера, дополнительно введены сканирующие устройства с цифровыми регистраторами и микропроцессорами, выходы каждого из которых связаны с дополнительно введенными датчиком контроля концентрации напряжения, датчиком контроля толщины стенки трубы газопровода, магнитометрическим датчиком регистрации интенсивности магнитного поля, и датчиком контроля температуры, а выходы их связаны с входами аналого-цифрового преобразователя.

На рис.3.1.1 представлена схема устройства контроля технического состояния и режимных параметров газопроводов.

Устройство контроля технического состояния и режимных параметров газопроводов выполнено из сканирующих устройств 1, выходы которых соответственно связаны с входом датчика 2 концентрации напряжения, с входом датчика 3 температуры, с входом датчика 4 контроля толщины стенки трубы газопровода, с входом магнитометрического датчика 5, а выходы всех этих датчиков связаны с аналого-цифровым преобразователем 6 и посредством интерфейса 7 с компьютером 8.

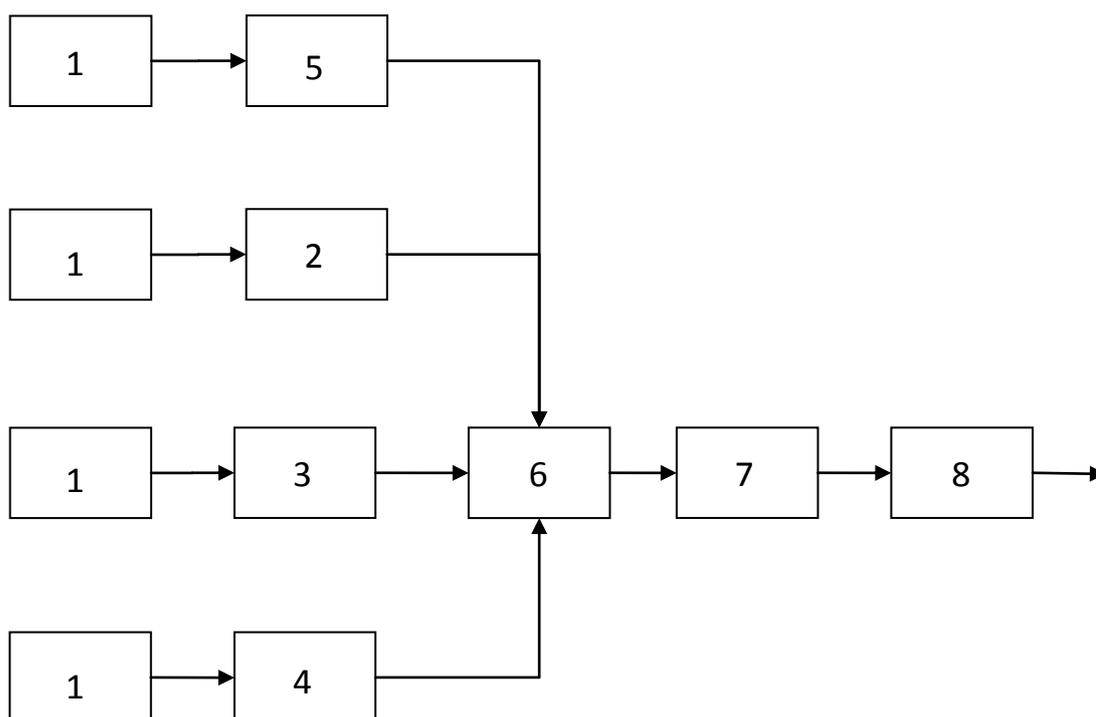


Рис.3.1.1. Устройство контроля технического состояния и режимных параметров газопроводов

Работает устройство контроля технического состояния и режимных параметров газопроводов следующим образом. Сканирующими устройствами 1 производят сканирование исследуемой поверхности трубы газопровода, т.е. обеспечивают связь с газопроводом распределительной сети, снимают сигналы с трубы газопровода и передают последовательно датчику 2 концентрации напряжения, датчика 3 температуры, датчику 4 контроля толщины стенки трубы газопровода, магнитометрического датчику 5, которые регистрируют комплексные показатели обеспечивающие их прогнозирование через аналого-цифровой преобразователь 6, включающий цифровой регистратор и микропроцессор, соответствующих требуемому уровню надёжности функционирования газопроводов распределительных сетей. Микропроцессор аналого-цифрового преобразователя 6 получает информацию о техническом состоянии и режимных параметрах газопроводов

на основе регистрации комплексных показателей с цифрового преобразователя, и, по установленным – запрограммированным в нём зависимостям осуществляет прогнозирование комплекса характеристик технического состояния и режимных параметров передаёт их через беспроводной канал связи – интерфейс 7 в компьютер 8, который обеспечивает по программе отражение картины их изменения во времени.

Датчик 3 контроля температуры (инфракрасный термометр) обеспечивает контроль температуры в единице объёма, с помощью него можно найти участки поверхности с температурой, выше заданной, что позволяет прогнозировать объём газа и давления в газопроводе распределительных сетей. Причём перед началом измерений в него вводят поправки, соответствующие свойствам материалов газопровода, изоляции и окружающей их среды, корректируя его показания, компенсируя недостаточную излучающую способность. Датчик 4 контроля толщины стенки трубы газопровода, основанный на магнитометрическом контроле – методе толщинометрии, позволяет определить его остаточный ресурс. Магнитометрический датчик 5 обеспечивает контроль интенсивности магнитного поля для определения зон магнитной аномалии и их распространения, что позволяет установить связь этих аномалий с зонами концентрации напряжений и различными видами развивающихся повреждений. Анализ комплексности показателей, регистрируемых датчиками 2, 3, 4, 5 доказывает точность выбранных контролируемых характеристик, которые позволяют прогнозировать их производные, где каждый из перечисленных факторов прямо или косвенно влияет также на величину остаточной скорости коррозии и текущее коррозионное состояние газопроводов распределительных сетей. Кроме того диапазон изменения характеристик технического состояния и режимных параметров газопроводов влияет на его диаметр и толщину стенки, рабочее давление, взаимное расположение относительно друг друга соседних подземных сооружений, наличие требуемого уровня их электротехнической защиты, в

общем плане на остаточный их ресурс и надёжность их функционирования. Применение аналого-цифрового преобразователя 6 в этом комплексе позволяет совместно с дальнейшей обработкой компьютера 8 и интерфейса 7.

Использование предложенного технического решения позволило расширить технологические возможности устройства и обеспечить качество измерений, путем соединения взаимосвязываемых параметров регистрируемых процессов, происходящих в газопроводах распределительных сетей и прогнозировать во времени реальную картину технического состояния и режимных параметров, и, обеспечить формирование управляющих воздействий для регулирования режимов их работы.

Устройство регулирования давления в газопроводе относится к электромеханическим системам контроля и регулирования давления газа в газопроводах.

Задачей предложенного технического решения является повышение точности задания и поддержания давления.

Поставленная задача достигается тем, что устройство регулирования давления газа в газопроводе содержащее задатчик и датчик давления, блок сравнения, дополнительно введены аналого-цифровой преобразователь с микропроцессором, интерфейс, компьютер, реактивно-вентильный двигатель, регулировочный винт комбинированного регулятора давления, причем первый выход аналого-цифрового преобразователя с микропроцессором связан с компьютером посредством интерфейса, второй выход аналого-цифрового преобразователя с микропроцессором последовательно связан с реактивно-вентильным двигателем, регулировочным винтом комбинированного регулятора давления, задатчиком давления, выход которого связан с первым входом аналого-цифрового преобразователя с микропроцессором и входом блока сравнения, выход которого связан со вторым входом аналого-цифрового

преобразователя с микропроцессором, второй вход блока сравнения связан с датчиком давления газопровода.

На рис.3.1.2 представлена схема устройства регулирования давления газа в газопроводе.

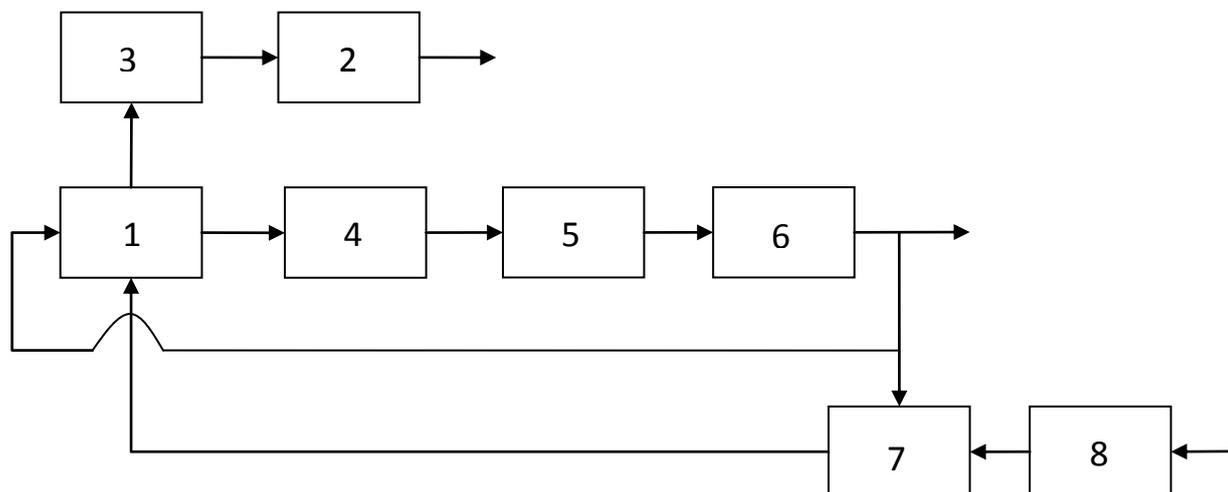


Рис.3.1.2. Устройство регулирования давления газа в газопроводе

Устройство регулирования давления газа в газопроводе содержит аналого-цифровой преобразователь 1 с микропроцессором выход которого связан с компьютером 2 посредством интерфейса 3, второй выход аналого-цифрового преобразователя 1 с микропроцессором связан последовательно с реактивно-вентильным двигателем 4 и с регулировочным винтом 5 комбинированного регулятора давления, с датчиком давления 6, выход которого связан с первым входом аналого-цифрового преобразователя 1 с микропроцессором и входом блока сравнения 7, выход которого связан со вторым входом аналого-цифрового преобразователя 1 с микропроцессором, второй вход блока сравнения 7 связан с датчиком давления 8 газопровода.

Работает устройство регулирования давления газа в газопроводе следующим образом. Реактивно-вентильный двигателем 4 безредукторный и искро взрыво безопасного исполнения имеет вал вращения, который жестко

соединен с валом регулировочного винта 5 комбинированного регулятора давления, обеспечивая точность позиционирования. Управление поворотом вала реактивно-вентильного двигателя 4 осуществляет аналого-цифровой преобразователь 1 с микропроцессором, который также передает через интерфейс 3 информацию на компьютер 2. Для формирования управляющего воздействия на обмотку реактивно-вентильного двигателя 4 аналого-цифровым преобразователем 1 с микропроцессором контролируют положение вала регулировочного винта 5 комбинированного регулятора давления задатчиком давления 6, информация от которого на него передается и на блок сравнения 7, являющегося корректирующим элементом. Датчик давления 8 газопровода выдает информацию о давлении в газопроводе. Величина сигнала с задатчика давления 6 и датчика давления 8 газопровода должна быть одинакова, но с противоположными знаками (+) и (-). В случае отклонения величин сигналов с задатчика давления 6 и датчика давления 8 газопровода блок сравнения 7 работает в режиме корректирующего элемента и величина отклонения передается на аналого-цифровой преобразователь 1 с микропроцессором, который формирует управляющее воздействие на обмотку реактивно-вентильного двигателя 4, вал которого имеет вращение в ту или другую сторону, поворачивая вал регулировочного винта 5 комбинированного регулятора давления. Таким образом обеспечивается обратная связь по давлению газа в газопроводе. Аналого-цифровой преобразователь 1 с микропроцессором, интерфейс 3 и компьютер 2 работают в режиме маршрутизатора для передачи управляющего воздействия на соответствующую обмотку реактивно-вентильного двигателя 4 и соответствующий ему вал регулировочного винта 5 комбинированного регулятора давления.

Предложенное техническое решение позволило повысить точность задания в два раза и добиться поддержания требуемого уровня давления.

Устройство управления электрохимической защитой газопроводов относится к устройствам катодной защиты магистральных газопроводов от коррозии, вызванных блуждающими токами и физико-химическими характеристиками почвы, путём катодной и анодной поляризации.

Задачей предложенного технического решения является повышение безопасности эксплуатации и эффективности управления электрохимической защитой от коррозии газопроводов.

Поставленная задача достигается тем, что устройство управления электрохимической защитой газопроводов содержит источник питания, измерительный электрод, вспомогательный электрод-анод, причем в него дополнительно введены усилительная-скрепляющая сетка «рабица» - дублер являющаяся изоляционным слоем газопровода защищая от коррозии, датчик контроля внешнего катодного тока, аналого-цифровой преобразователь, интерфейс, компьютер, причем выход источника питания связан с первым входом усилительной-скрепляющей сетки «рабица», соединенной с вспомогательным электрод-анодом, второй вход усилительной-скрепляющей сетки «рабица» связан с первым выходом измерительного электрода, выход которого последовательно связан с датчиком контроля внешнего катодного тока, с аналого-цифровым преобразователем, интерфейсом, компьютером, а выход аналого-цифрового преобразователя связан с входом источника питания.

На рис.3.1.3 изображена схема устройства управления электрохимической защитой газопроводов.

Устройство управления электрохимической защитой газопроводов содержит источник питания 1, выход которого связан с первым входом усилительной-скрепляющей сетки «рабица» 2, соединенной с вспомогательным электрод-анодом 3, второй вход усилительной-скрепляющей сетки «рабица» 2 связан с первым выходом измерительного

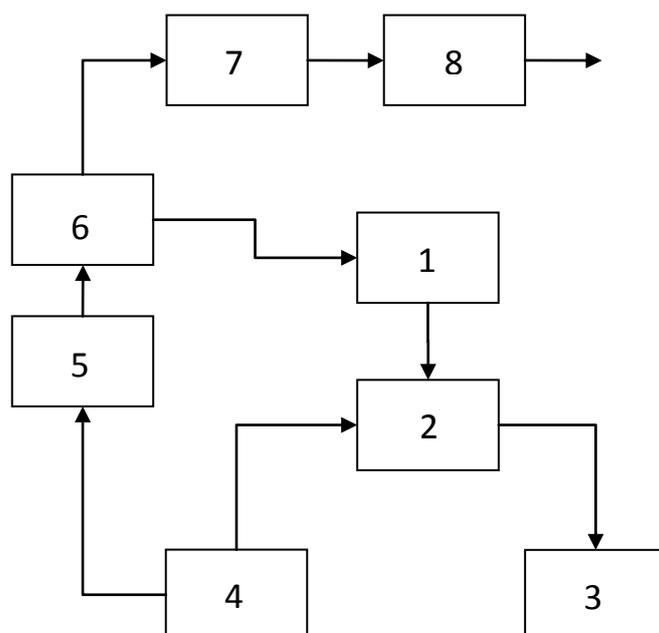


Рис.3.1.3. Устройство управления электрохимической защитой газопроводов

электрода 4, выход которого последовательно связан с датчиком контроля 5 внешнего катодного тока, с аналого-цифровым преобразователем 6, интерфейсом 7, компьютером 8, а второй выход аналого-цифрового преобразователя 6 связан с входом источника питания 1.

Работает устройство управления электрохимической защитой газопроводов следующим образом. Поскольку электрохимическая защита основана на том, что сдвигая потенциал металла пропусканием внешнего тока, можно изменять скорость его коррозии. Увеличение внешнего катодного тока до величины обеспечивающей достижение равновесного потенциала полностью подавляет коррозионный процесс как в дублёре — сетке «рабице» 2 изоляции стального газопровода, так и в самом газопроводе. Изменение внешнего катодного тока обеспечивают источником питания 1, обеспечивающим формирование управления наложением внешнего катодного тока для повышения эффективного функционирования катодной электрохимической защиты. Для контроля фактической величины катодного тока используется датчик контроля 5 внешнего катодного тока, соединённый через измерительный электрод 4 с сеткой - «рабицей» 2 и с аналогово-

цифровым преобразователем 6 с микропроцессором, который управляет регулируемым источником питания 1, соединённым с сеткой - «рабицей» 2, образующими измерительно-управляющую цепь, регулирующую изменение внешнего катодного тока. Причем измерительный электрод 4, соединенный через датчик контроля 5 и аналогово-цифровой преобразователь 6 подключен к минусу источника питания 1, плюс которого со вспомогательным электродом -анодом 3 через дублер — сетку «рабицу» 2 изоляции стального газопровода, чтобы стекающий с него ток натекал на катод достаточно равномерно.

Помимо этого, аналогово-цифровой преобразователь 6 с микропроцессором информацию о процессе регулирования величины внешнего катодного тока передает через интерфейс 7 на компьютер 8.

Мониторингом физико-химических характеристик почвы и формирования блуждающих токов устанавливаются наиболее опасные участки по фактору коррозии, требующие для каждого из них своего формирования изменения внешнего катодного тока. Поэтому в данном случае аналогово -цифровой преобразователь 6 с микропроцессором, интерфейсом 7 и компьютером 8 работают также в режиме маршрутизатора для передачи управляющего воздействия на соответствующий источник питания 1, обеспечивающий формирование управления наложением внешнего катодного тока для повышения эффективности функционирования катодной электрохимической защиты по данным участкам.

Предложенное техническое решение разработано на уровне опытного образца, испытания которого показали его работоспособность, возможность контроля и повышения эффективности управления электрохимической защитой газопроводов и определились возможности своевременного прогнозирования аварийных ситуаций, путем повышения безопасности эксплуатации.

Предлагаемые технические решения позволяют обеспечивать функциональную связь конструктивных схем электротехнических и

электромеханических модулей комплексной системы контроля и управления балансировкой газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, и, эффективное их функционирование.

3.2. Математическое описание взаимодействия электротехнических и электромеханических элементов

На основании анализа использования нейронной сети с применением разработанного математического аппарата проведено моделирование режимов работы электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, и, системы их диагностики в комплексе с использованием приложения MatLab SimPowerSystems, в результате которого получена обобщенная структурная схема (рис.3.2.1).

В состав обобщённой структурной схемы (рис.3.2.1) входит: 1- стальной газопровод ; 2- слой электрохимической защиты изоляции; 3- слой изоляции с рабицей; 4- датчик давления в стальном газопроводе; 5- реактивно-вентильный электродвигатель комбинированного регулятора давления газа; 6- регулировочный винт комбинированного регулятора давления газа; 7- задатчик давления газа в газопроводе; 8- источник питания постоянным током с регулятором тока; 9- аналого-цифровой преобразователь с микропроцессором; 10- интерфейс; 11- компьютер; СКН - сканирующее устройство концентрации напряжения; СТ - сканирующее устройство температуры; СТС - сканирующее устройство контроля толщины стенки стального газопровода; СМУ – сканирующее магнитометрическое устройство; ДКН - датчик концентрации напряжения; ДТ - датчик температуры; ДТС - датчик контроля толщины стенки стального газопровода; ДМ – датчик магнитометрический для контроля интенсивности магнитного поля для определения зон магнитной аномалии и их распространения; ВЭ – вспомогательный электрод; ИЭ - измерительный электрод; ДКВКТ – датчик

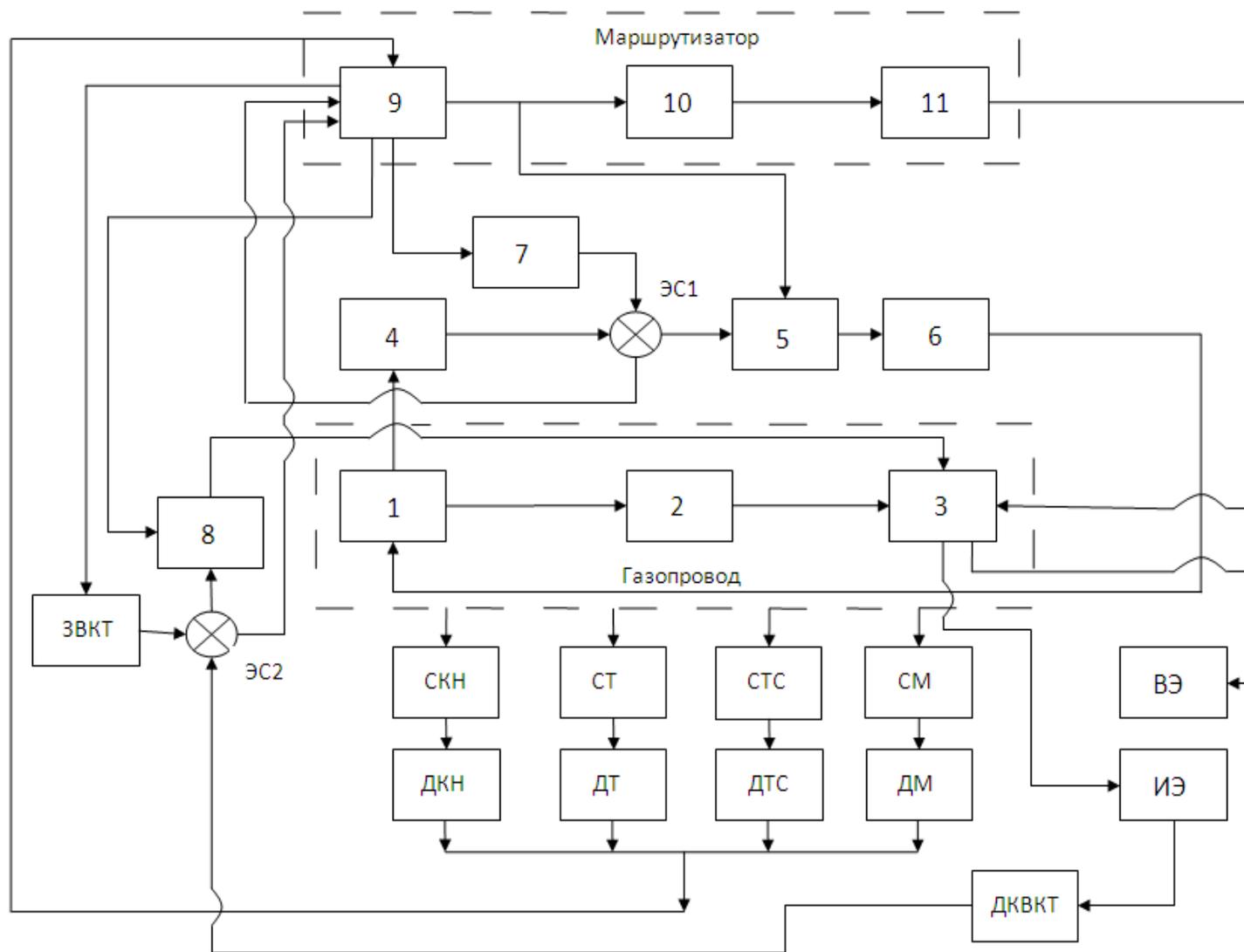


Рис.3.2.1. Обобщённая структурная схема функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий

контроля внешнего катодного тока; ЗВКТ - задатчик внешнего катодного тока; ЭС1, ЭС2 – элементы сравнения.

Из структуры функциональных связей (рис.3.2.1) следует, что экспресс диагностика (1-2-3) осуществляется СКН – ДКН, СТ – ДТ, СТС – ДКС и СМ - ДМ.

Разработан регламент диагностики технического состояния газораспределительных сетей и режимных параметров газопроводов с учётом совместимости и требуемых уровней надёжности (рис.3.2.2), частота которого должна быть не реже одного раза в 0,5 – 2 года.

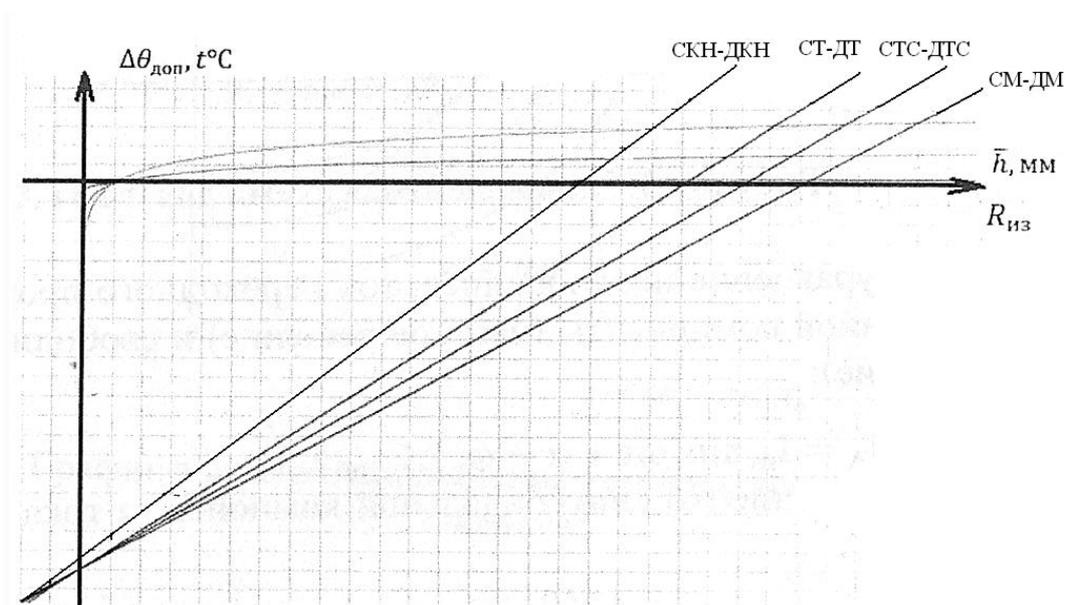


Рис.3.2.2. Уровни совместимости

Разработанный регламент диагностики технического состояния газораспределительных сетей и режимных параметров, отвечающий поставленным задачам и учитывающий уровень совместимости электротехнических средств контроля, базируется на принципе их трассировки с включением в структуру средств контроля магнитоиндуктивного магнитометра, основу которого составляет стабильный высокочастотный колебательный контур, входящий в состав генератора, и, подключенный к нему фильтр присоединения [83, 86-89, 107]. Изменение напряжённости внешнего магнитного поля, вызванного наличием мест

концентрации напряжений в газопроводах и дополнительным негативным влиянием на них коррозионных процессов (см. гл.1), приводит к пропорциональному изменению индуктивности катушки и соответственно к изменению частоты генератора, а фильтр присоединения ограничивает влияние блуждающих токов и других источников, образующих разность потенциалов, на результат обработки полученной информации о техническом состоянии газораспределительных сетей и режимных параметров газопроводов (рис. 3.2.3).

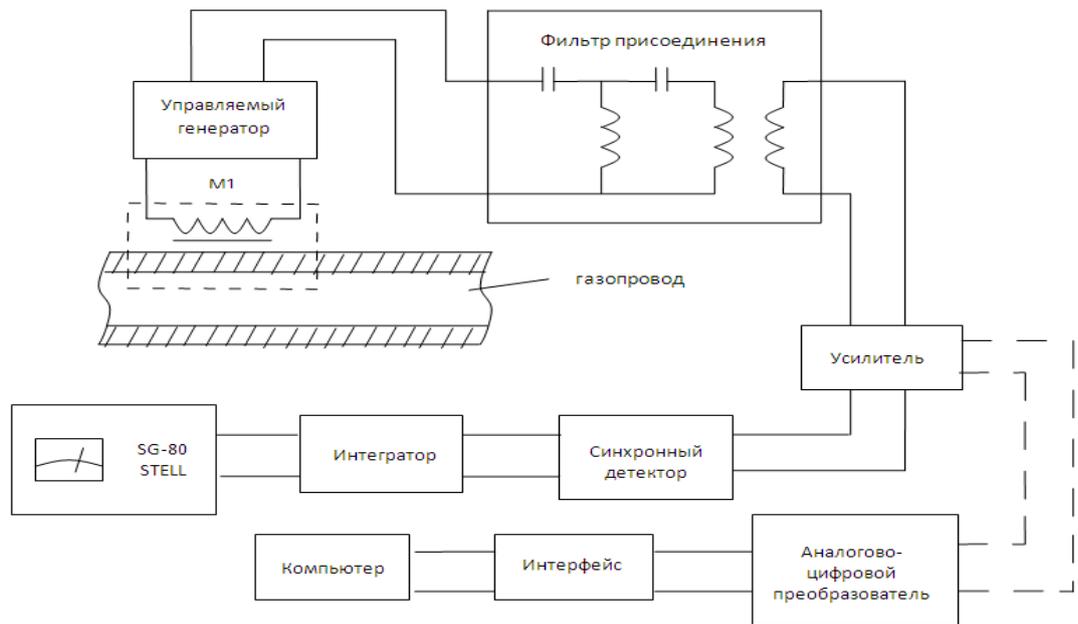


Рис. 3.2.3. Схема подключения через фильтр присоединения

Амплитудно-частотная характеристика фильтра присоединения показана на рисунке 3.2.4. Из этого рисунка видно, что фильтр присоединения представляет собой фильтр верхних частот. Он свободно пропускает в оболочку сканеров (см. 3.1) газопровода ток от управляемого генератора и предотвращает попадание напряжения, формируемого блуждающими токами и других источников, образующих разность потенциалов,

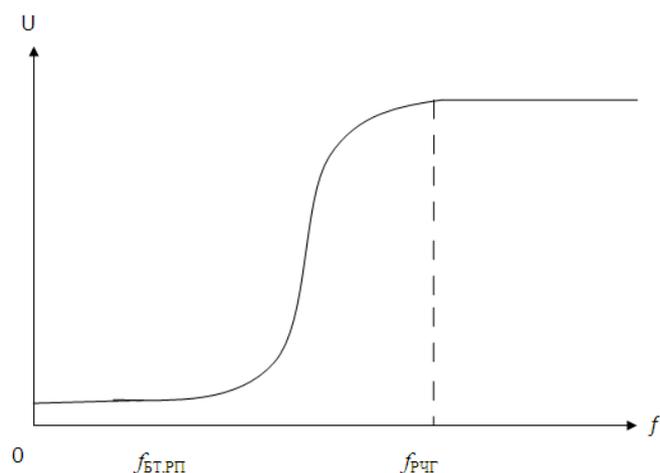


Рис. 3.2.4. Генерируемые частоты

где $f_{БТ,РП}$ – частота напряжения, вызванная блуждающими токами и другими источниками, формирующих разность потенциалов, а $f_{РЧГ}$ – рабочая частота управляемого генератора [83, 86-89].

Принимая индукционным приёмником сигналы на частоте $f_{РЧГ}$ определяется точное местонахождение не только явных дефектов, но и зарождающихся дефектов в газораспределительных сетях и их газопроводах. Применение микропроцессорной и компьютерной техники позволяет автоматизировать процесс измерения магнитного поля, а также наличие указанных элементов в схеме (рис. 3.2.3) позволяет создавать онлайн-карту с отметками участков как с дефектами, так и с зарождающимися дефектами, а также отклонений режимных параметров газораспределительных сетей и их газопроводов от их рациональных режимных параметров, что позволяет эффективно формулировать управляющие воздействия в процессе эксплуатации как систем так и сетей.

На основании анализа конструктивных схем электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей (см. 1.2) и схемы (рис. 3.2.3) установлено, что дифференциальное уравнение, связывающее ток и падение напряжения в них соответствует одной фазе и обобщенной однофазной эквивалентной схеме замещения (рис. 3.2.5) [83, 86-89, 107].

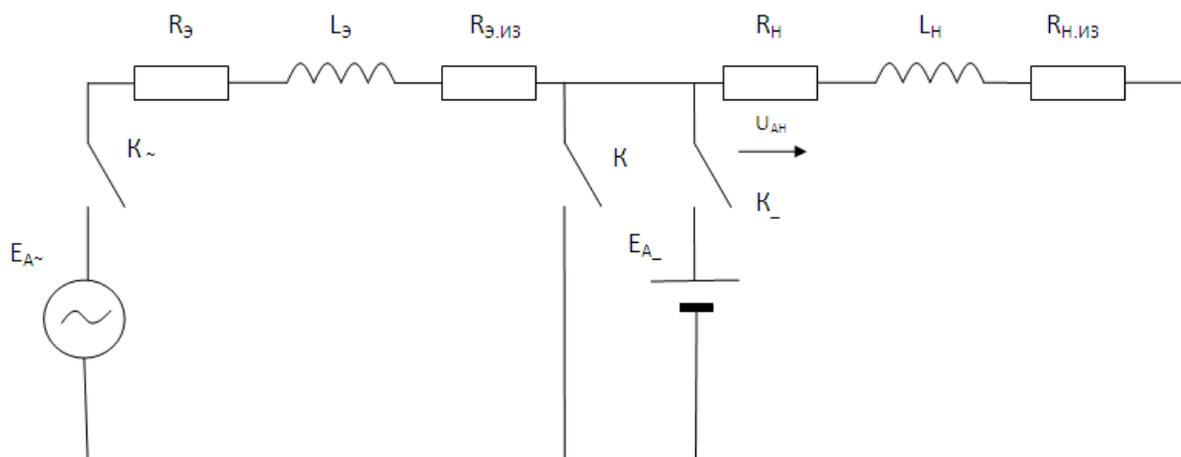


Рис. 3.2.5. Обобщенная однофазная эквивалентная схема замещения

В данном случае, амплитуда синусоидальной компоненты тока при замкнутом K_{-} и к моменту замыкания K (рис. 3.2.5) [83]

$$J_m(0) = \frac{U_m}{\sqrt{(R_K + R_H)^2 + \omega(L'_K + L'_H)^2}}, \quad (3.2.1)$$

а активное сопротивление R_{20} при 20°C

$$R_t = R_{20} e^{\alpha(t - 20)}, \quad (3.2.2)$$

$$t = \frac{R_t}{R_{20} e^{\alpha}} - 20, \quad (3.2.3)$$

где α - температурный коэффициент сопротивления; t – температура.

На основании (3.2.2) определён закон распределения и график распределения, где точка пересечения функций этих зависимостей показывают уровень совместимости системы «газопровод-устройство контроля технического состояния газораспределительных сетей и их режимных параметров» (рис. 3.2.2).

Прогнозирование технического состояния электротехнических и электромеханических систем, а также газораспределительных сетей и их режимных параметров основывается на прогнозировании изменения их контролируемых параметров с использованием аппроксимирующей функции в виде степенного полинома[83]

$$\Delta Z_j(t) = B_{cj}t^{\beta j} + \Delta Z_{\varepsilon j} + \Delta \Pi_{Zj}, \quad (3.2.4)$$

где $\Delta Z_j(t)$ - изменение функционального параметра; B_{cj} - скорость изменения j -го функционального параметра; β - показатель степени; $\Delta Z_{\varepsilon j}$ - случайное отклонение фактического изменения параметра и теоретической реализации из-за влияния внешних факторов по закону нормального распределения (распределение Гаусса); $\Delta \Pi_{Zj}$ - значение параметра, определяющееся процессом выхода на номинальный режим.

На основании (3.2.4) результатов экспериментов, анализа статических данных для прогнозирования Z получим

$$Z(t) = \bar{Z}_0(t_0) + B_Z t^\beta, \quad (3.2.5)$$

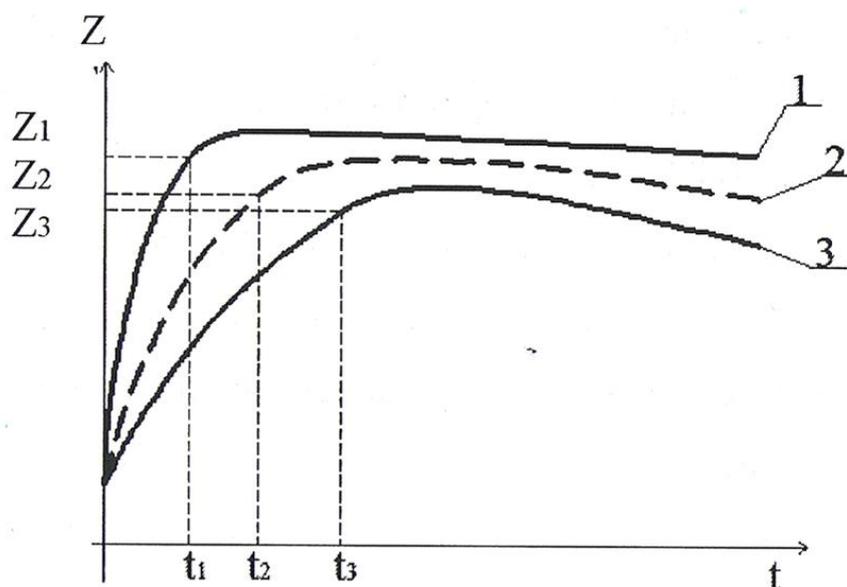
где $Z(t)$ - математическое ожидание параметра прогнозирования в функции наработки; $\bar{Z}_0(t_0)$ - математическое ожидание параметра после приработки; B_Z - коэффициент, показывающий среднюю скорость изменения параметра; β - показатель степени, выбираемый на основе экспериментальных данных. Тогда остаточный ресурс с нормируемой вероятностью выработки ресурса p^* электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, и, газопроводов можно определить по формуле[83]

$$T_{\text{ост}} = \left[\frac{Z'(t_k) - (Z_q^* + \delta_Z)}{B_Z} \right]^{\frac{1}{\beta}}, \quad (3.2.6)$$

где $Z'(t_k)$ - значение параметра Z в момент контроля t_k ; Z_q^* - допустимое значение диагностического параметра (в соответствии с паспортом); δ_Z - доверительное отклонение, определяемое с учётом дисперсии распределения параметра D_Z и p^* (от 0,85 до 0,995).

На основании ранее изложенных данных, диагностическими признаками является техническое состояние и режимные параметры как систем, так и сетей. Будем использовать безразмерный параметр прогнозирования, как отношение скоростей изменения характеристик технического состояния и режимных параметров как систем, так и сетей в работающих и

предельно изношенных элементах. На рис. 3.2.6 показана схема определения режимного параметра Z в них[83].



1-абсолютно исправный элемент;

2- элемент, находящийся в допустимом диапазоне;

3- предельно изношенный элемент

Рисунок 3.2.6. Схема нахождения параметра прогнозирования в электротехнических и электромеханических системах балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и их режимных параметров

Получим:

$$Z_{k1} = \left(\frac{Z_1 - Z_H}{t_1} \right) \cdot \left(\frac{t_2}{Z_2 - Z_H} \right); \quad (3.2.7)$$

$$Z_{k2} = \left(\frac{Z_2 - Z_H}{t_1} \right) \cdot \left(\frac{t_2}{Z_2 - Z_H} \right); \quad (3.2.8)$$

$$Z_{k3} = \left(\frac{Z_3 - Z_H}{t_i} \right) \cdot \left(\frac{t_2}{Z_2 - Z_H} \right), \quad (3.2.9)$$

где Z_H - начальные значения при диагностике; Z_{ki} и Z_{kj} - значения в диагностируемом и предельно изношенном объектах соответственно; t_i – момент времени при диагностировании; t_2 – момент времени нахождения объекта в нормальном состоянии.

На основании [29] рекомендуется принимать для быстропротекающих процессов расчетные величины с коэффициентом 0,95.

Критерием исправности или неисправности являются соотношения:

- $Z > 1$ – исправен;
- $Z \leq 1$ – неисправен.

Величины характеристик технического состояния и режимных параметров как систем, так и сетей (номинальные) определены в паспортах на оборудование, а также ГОСТами.

Методика прогнозирования технического состояния и режимных параметров как систем, так и сетей будет разделена на следующие этапы:

- получаем данные устройств диагностики;
- находим экспериментальное значение параметра по (3.2.5) и строим $Z'(t)$ (рис. 3.2.7);
- используя метод наименьших квадратов в программе «Matlab», находим параметры функции (3.2.5). Полученная модель изменения параметра $\bar{Z}(t)$ представляет собой математическое изменение параметра Z_i (рис. 3.2.7);
- для нахождения показателей распределения экспериментальных реализаций параметра прогнозирования имеющиеся данные разбиваем на $(N+1)$ - группу в зависимости от наработки t . Нулевую группу составят узлы при $t=0$;
- для каждой группы рассчитываются значения математического ожидания $\bar{Z}'(t_i)$, дисперсии $D_{Z'}(t_i)$ и среднего квадратического отклонения $\sigma_{Z'}$ (t_i):

$$\bar{Z}' = \frac{1}{K} \sum_{1}^{K} Z'_i; \quad (3.2.10)$$

$$D_{Z'} = \frac{1}{K} \sum_{1}^{K} (\bar{Z}' - Z'_i)^2; \quad (3.2.11)$$

$$\sigma_{Z'} = \sqrt{D_{Z'}}, \quad (3.2.12)$$

где K - число параметров в рассматриваемой группе;

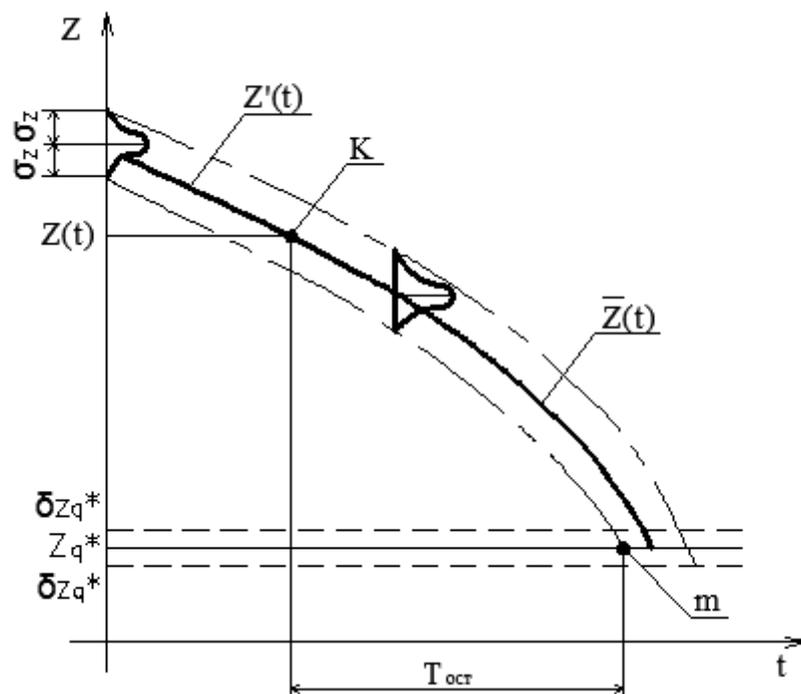


Рисунок 3.2.7. Нахождение остаточного ресурса электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, а также как систем, так и сетей

- задаём величину вероятности выработки элементом своего ресурса $p^*(T_{рн})$, верхнюю и нижнюю доверительные границы нашего статического распределения. Рассчитывается доверительное отклонение δ нашей математической модели математического распределения:

$$\delta = \sigma_{Z'cp} \cdot q, \quad (3.2.13)$$

где q – параметр, получаемый из таблиц функций Лапласа.

$$\sigma_{Z'cp} = \frac{1}{N+1} \sum_{j=1}^N \sigma_{Zj}, \quad (3.2.14)$$

$$\Phi(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \left(1 - \frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (3.2.15)$$

Положим:

$$2\Phi(q) = p(|x - a|) < \sigma_q = p^*(T_{PH}). \quad (3.2.16)$$

- на график $Z(t)$ (рис. 3.2.6) наносим верхнюю и нижнюю доверительные границы. Точка пересечения m с полем допуска параметра Z^*_q при эксплуатации находится следующим образом:

$$T = \left(\frac{\bar{Z}_0 - Z^*_q}{B_0} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (3.2.17)$$

где B_0 – коэффициент, показывающий скорость изменения характеристик технического состояния и режимных параметров как систем, так и сетей после процесса приработки.

С учетом смещения нижней доверительной границы ресурс элемента с указанной вероятностью найдём по формуле:

$$T_{PH} = \left(\frac{\bar{Z}'_0 - (Z^* + \delta)}{B_0} \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (3.2.18)$$

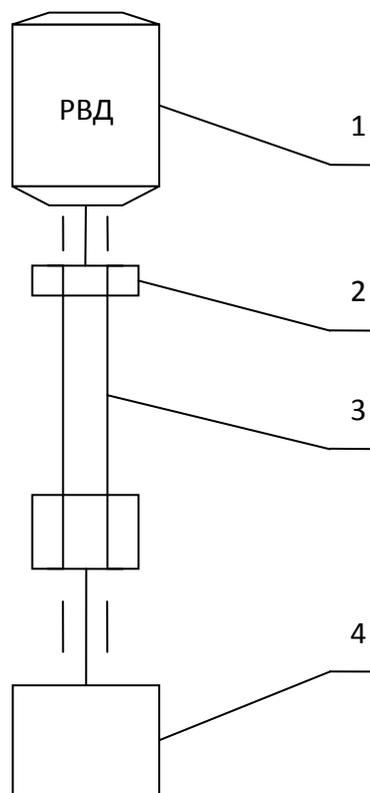
Формула (3.2.18) позволяет определить с вероятностью P^*_{PH} оставшийся ресурс объекта. Надёжность как систем, так и сетей с учётом диагностирования их технического состояния и режимных параметров на определённый момент времени эксплуатации через параметр Z оценивается коэффициентом готовности (рис. 3.2.6):

$$k_{ГД} = \frac{P_2(t) - P_3(t)}{P_1(t) - P_3(t)} \leq 1, \quad (3.2.19)$$

Величины T_{PH} и $k_{ГД}$ оценивают надёжность электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и

электрохимической защиты газопроводов, а также как систем, так и сетей и в период их эксплуатации с учетом диагностирования.

Математическая модель электромеханической системы комбинированного регулятора давления газа с реактивно-вентильным двигателем представляет собой структуру, масса которой распределена определенным образом в ее элементах, а звенья связей между элементами обладают упругими и диссипативными свойствами. Расчетную схему механической части системы с электродвигателем можно представить как трехмассовую систему:



**Рис. 3.2.8. Расчетная схема электромеханической системы
1 - приводной электродвигатель, 2,3 – опорные устройства для
регулирующего винта(РВ),
4 — исполнительный элемент**

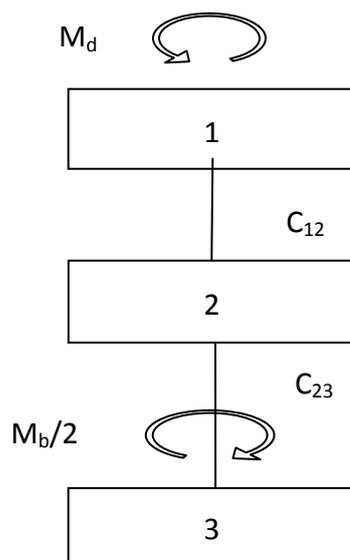


Рис. 3.2.9. Расчетная схема, приведенная к валу ротора

В общем виде модель описывается дифференциальными уравнениями вида [108]:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = M_d - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - \mu(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2), \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \mu(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) - \mu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3), \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 = c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + \mu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - \frac{M_b}{2} \end{cases} \quad (3.2.20)$$

где: M_d - момент на валу электродвигателя, M_b - момент на валу РВ, φ_i - угловая координата i -го сечения, $\dot{\varphi}_i$ - угловая скорость i -го сечения, $\ddot{\varphi}_i$ - угловое ускорение i -го сечения, μ - коэффициент трения.

Электромагнитные процессы в РВЭД описываются системой уравнения Кирхгофа. Так управление фазового направления для j -ой фазы:

$$U_j = R \cdot i_j + \frac{d\Psi_j(\theta, i_j)}{dt} \quad (3.2.21)$$

где: R - фазовое сопротивление; Ψ_j - потокосцепление; U_j - фазовое напряжение; i_j - фазовый ток.

Потокосцепление вводятся в качестве дополнительных переменных, устанавливающих необходимую связь между токами и индуктивностями обмоток двигателя[108]:

$$\Psi_j = L_j(\theta)i_j \quad (3.2.22)$$

где $L_j(\theta)$ - собственная индуктивность обмотки j -ой фазы; θ - угол поворота ротора.

При отсутствии насыщения магнитной цепи электромагнитный момент РВЭД определяется выражением:

$$M = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m i_j^2 \frac{dL_j(\theta)}{d\theta} \quad (3.2.23)$$

Уравнение равновесия моментов на вал привода.

$$\begin{cases} M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{нр} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (3.2.24)$$

где ω - частота вращения; θ - угол поворота; J - суммарный момент инерции на валу привода; $M_{нр}$ - момент нагрузки; B - суммарный коэффициент трения.

Для расчета статических и динамических характеристик в диссертации использована обобщённая имитационная модель РВЭД [108]. Алгоритм математической модели РВЭД представлен на рис.3.2.10. Этот алгоритм отличается от известных моделей РВЭД тем, что в данной модели используется сквозной метод расчета, начиная с задания исходных параметров двигателя и ВК, расчета основных размеров и параметров магнитной цепи и оканчивается определением рабочих характеристик РВЭД. Алгоритм расчёта содержит 2 блока подпрограмм: проектный расчет РВЭД для определения статических параметров и имитационное моделирование при известных параметрах.

В соответствии с алгоритмом при моделировании на первом этапе расчета выполняется расчет токов фазы с помощью зависимости индуктивности и ЭДС обмотки от угла ротора. При моделировании могут изменяться и внешние параметры РВЭД: внешний момент на валу, напряжение питания и др. На втором этапе в соответствии с алгоритмом определяются электромагнитный момент, угловая скорость, угол поворота

ротора. Первый и второй этапы повторяется многократно до достижения определенного условия, которое задается временным интервалом.

На заключительном этапе результаты расчета выводятся в виде осциллограмм переменных РВЭД и динамических параметров. Реализация обобщенной математической модели РВЭД выполняется в математическом пакете MATLAB -SIMULINK. Имитационная модель в SIMULINK обладают удобством работы при достаточной точности и быстродействии.

Математическая модель позволяет проводить расчет статических и динамических характеристик РВЭД. Такое построение математической модели позволяет встраивать ее в программы, для последующей оптимизации системы по отдельным параметрам.

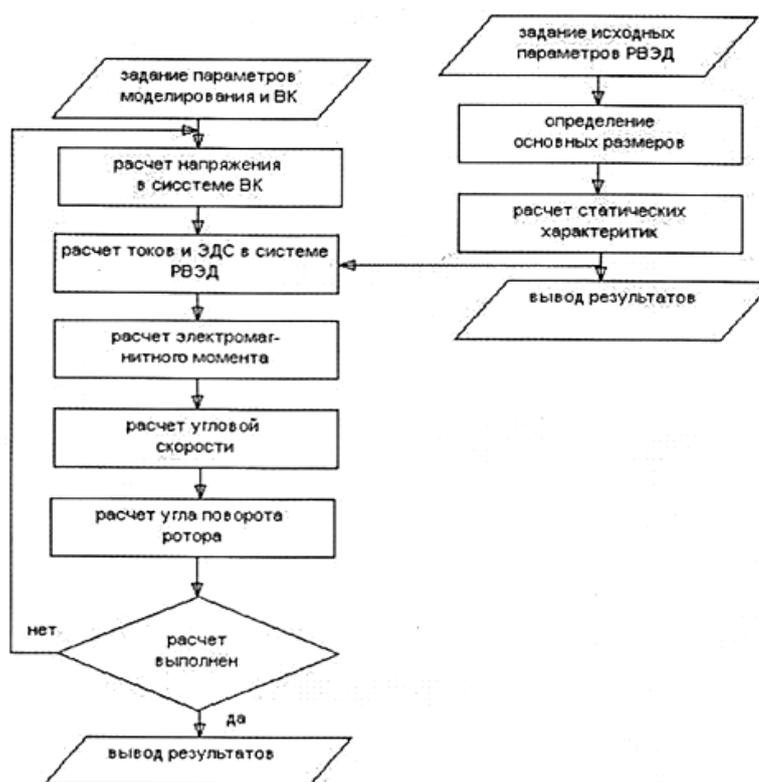


Рис.3.2.10. Алгоритм математической модели РВЭД

Общая схема имитационной модели трехфазной РВЭД с вентильным коммутатором показана на рис.3.2.11. Основные допущения, принятые при составлении имитационной модели: активные сопротивления фаз, не

зависящие от температуры обмотки статора; силовые транзисторы и диоды представлены функциональными резисторами; без учета взаимоиндукция фазных обмоток двигателя; без учета индуктивности рассеяния; безинерционные звенья датчика положения ротора и САУ.

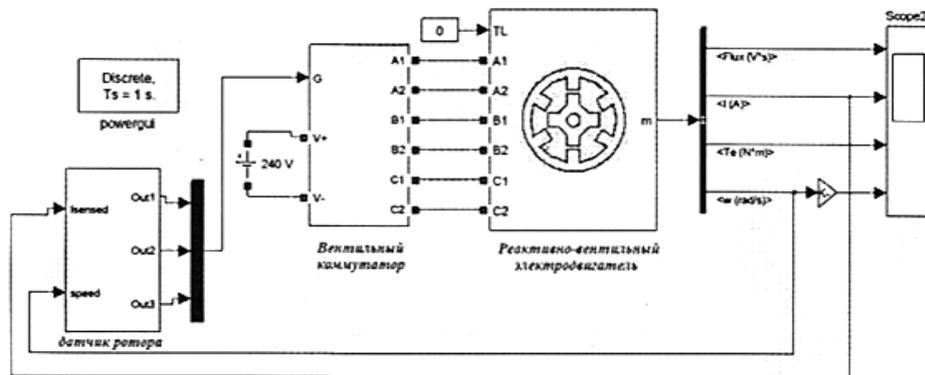


Рис.3.2.11. Общая схема РВЭД

В общую схему входят электродвигатель, вентильный коммутатор, датчик угла ротора, угол включения напряжения, угол отключения напряжения, осциллограмма, заданное устройство нагрузки, источник питания двигателя и коммутатора. Напряжение питания РВЭД подается от блока DC VoltageSource, который формирует источник постоянного тока.

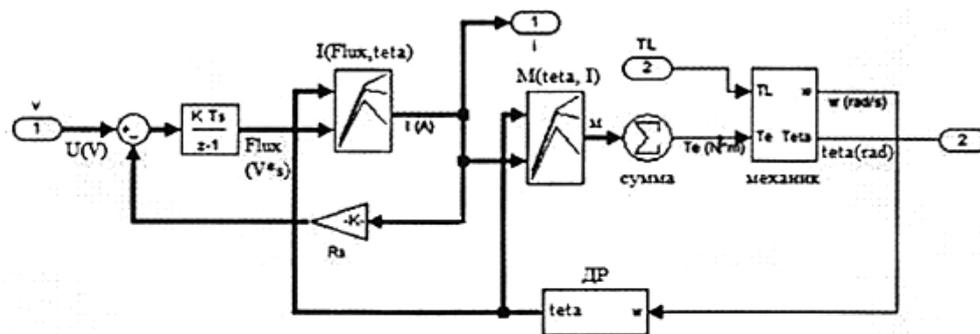


Рис.3.2.12. Структурная схема имитационной математической модели

На рис.3.2.12. показана структурная схема имитационной математической модели для каждой фазы. В эту схему входят блок Flux, блок тока, блок момента, блок механика. Блоком тока являются аппроксимационная таблица зависимости тока от угла ротора и

потокосцепления. Блоком момента являются аппроксимационная таблица зависимости момента от угла ротора и тока обмотки.

Потокосцепления РВЭД может быть таким образом представить на рис.3.2.10 и выражаться в виде функции тока статора и ротора

$$\begin{cases} \Psi(i, \theta) = L_q i + [L_{dsat} i + A(1 - e^{-Bi}) - L_q i] \cdot f(\theta); \\ A = \Psi_m - L_{dat} I_m; \\ B = \frac{L_d - L_{dsat}}{\Psi_m - L_{dat} I_m}, \end{cases} \quad (3.2.25)$$

где L_q - минимальная индуктивность; L_{dsat} - насыщенная индуктивность; L_d - ненасыщенная индуктивность; N_r - число полюсов ротора [109, 110].

Зависимость момента двигателя от угла поворота, тока и индуктивности вычисляется выражением (3.2.23) и определяется выражением [109, 110]

$$M_e(i, \theta) = \left[\frac{(L_{dsat} - L_q) \cdot i^2}{2} + Ai - \frac{A(1 - e^{-Bi})}{B} \right] \cdot f'(\theta)$$

$$f'(\theta) = 6 \frac{N_r^3}{\pi^3} \theta^2 - 6 \frac{N_r^2}{\pi^2} \theta \quad (3.2.26)$$

Механические динамика двигателя и нагрузки регулируются уравнения движения (3.2.24) и структура показана на рис.3.2.13 [108].

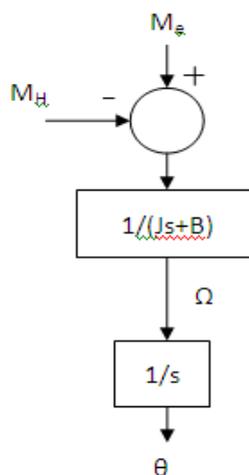


Рис.3.2.13. Моделирование механических характеристик двигателя и нагрузки.

Совместное математическое описание механической и приводной частей ЭМС позволяет получить окончательный вариант математического описания трехмассовой ЭМС с реактивно - вентильным электродвигателем:

$$\begin{aligned}
 M - (M_{21} - M_{13}) &= J_1 p \omega_1 \\
 M_{21} - M_{c2} &= J_2 p \omega_2 \\
 -M_{13} - M_{c3} &= J_3 p \omega_3 \\
 p M_{21} &= C_{21} (\omega_1 - \omega_2) \\
 p M_{13} &= C_{13} (\omega_3 - \omega_1) \\
 U_j &= R \cdot i_j + \frac{d\Psi_j(\theta, i_j)}{dt} \\
 M &= J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{\text{нр}}
 \end{aligned}
 \tag{3.2.27}$$

Систему уравнений (3.2.27) можно представить в виде структурной схемы (рис.3.2.14) [107].

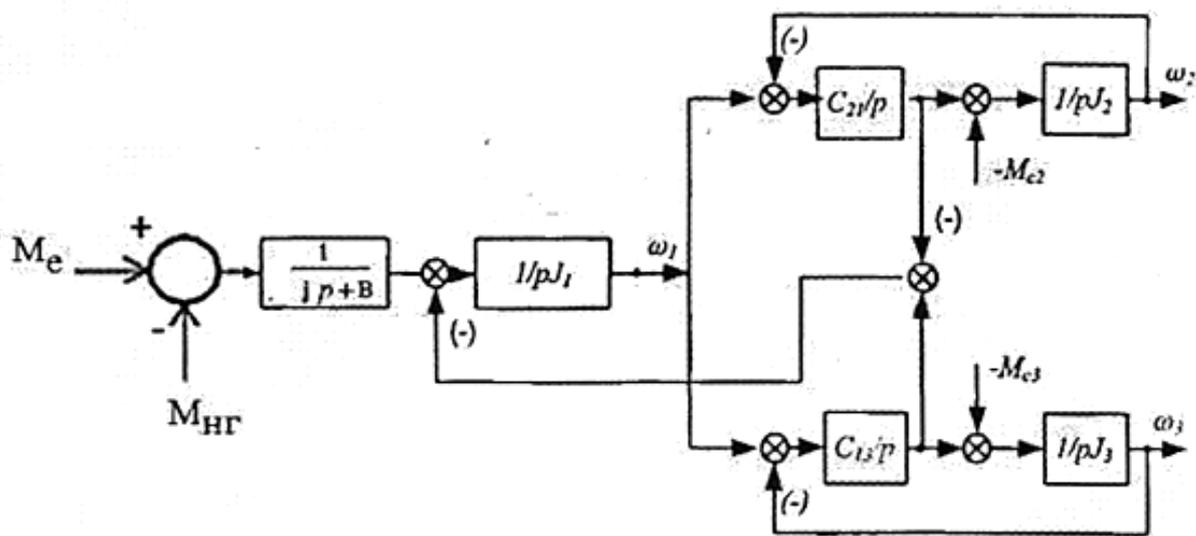
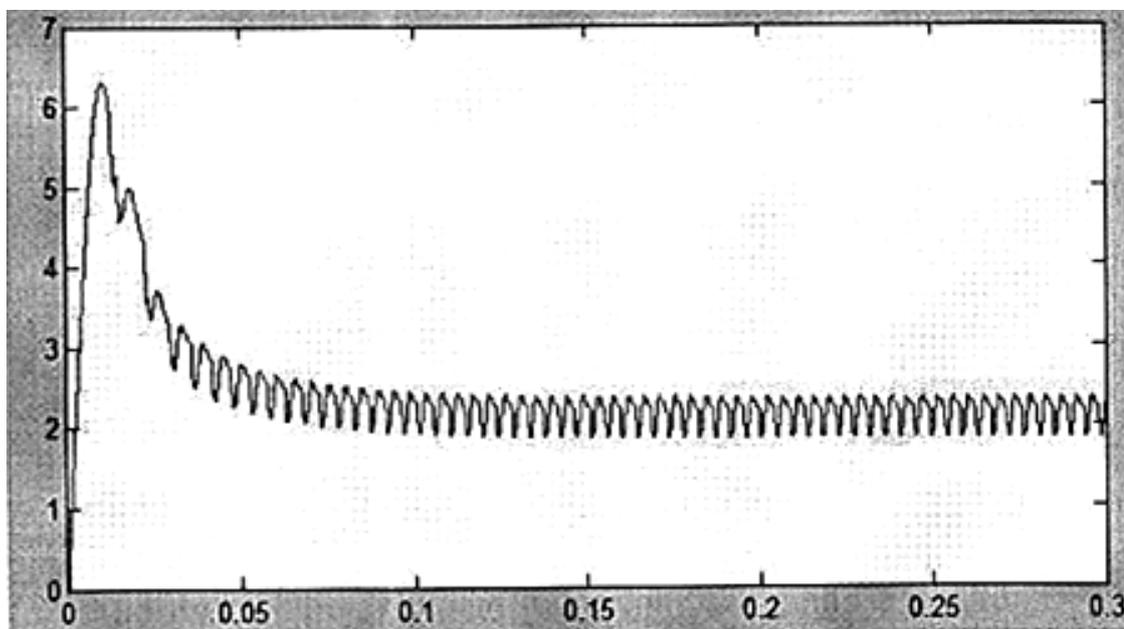


Рис.3.2.14. Структурная схема ЭМС с реактивно-вентильным электродвигателем.

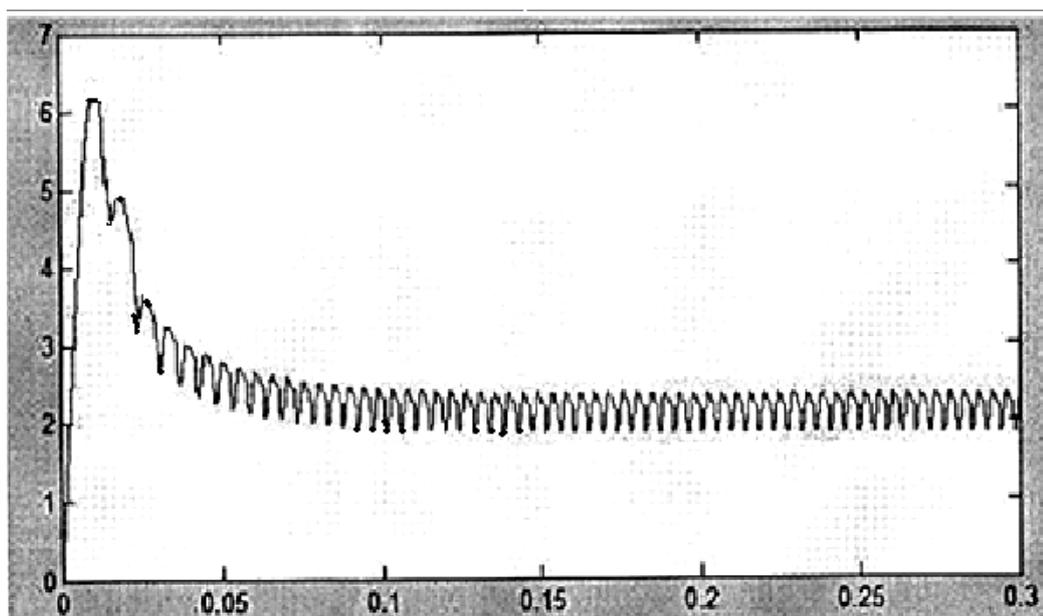
Исследование разработанной математической модели проводилось на ЭВМ с помощью пакета программ, разработанных для сложных дифференциальных уравнений.

Результаты исследования обобщенной математической модели: на основании вышеизложенного было проведено исследование разработанной математической модели на ПЭВМ с помощью пакета программ Matlab-Simulink.

На рис.3.2.15 представлены результаты моделирования переходных процессов реактивно-вентильного электродвигателя, работающего в прямом и обратном режимах, из которых следует, что повышение эффективности функционирования структуры математической модели и обеспечение требуемого уровня позиционирования регулировочного винта (рис. 1.2.8) достигнуто за счет введения в следящую систему идентификатора угла.



3.2.15 а) электромагнитный момент в прямом режиме



3.2.15 б) электромагнитный момент в обратном режиме

Рис.3.2.15. Результаты моделирования переходных процессов РВЭД.

Анализ конструктивных схем и физических процессов в электрохимической защите газораспределительных сетей и методов моделирования её режимных параметров (см.1.1.) и новое техническое решение по эффективной реализации управления электрохимической защитой газопроводов при искро-взрывобезопасном исполнении конструкции (см.3.1.) установлена идентификация в них переходных процессов для обобщённой структурной схемы функциональных связей электротехнических элементов модуля электрохимической защиты (рис.3.2.1).

На основе переходных процессов в элементах структурной схемы функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий определены их передаточные функции (рис.3.2.1):

$$W_1(P) = k_1, \quad (3.2.28)$$

$$W_2(P) = k_2, \quad (3.2.29)$$

$$W_3(P) = k_3, \quad (3.2.30)$$

$$W_4(P) = \frac{k_4}{T_4+1}, \quad (3.2.31)$$

$$W_5(P) = \frac{k_5}{T_5P+1}, \quad (3.2.32)$$

$$W_6(P) = \frac{k_6}{T_6P+1}, \quad (3.2.33)$$

$$W_7(P) = \frac{k_7(T_7P+1)}{(T_7P+1)k_7k_6}, \quad (3.2.34)$$

$$W_8(P) = \frac{k_8}{T_8P^2+1}, \quad (3.2.35)$$

$$W_9(P) = \frac{k_9(T_9P+1)}{(T_9P+1)T_9P+k_9}, \quad (3.2.36)$$

$$W_{10}(P) = \frac{k_{10}}{T_{10}P+1}, \quad (3.2.37)$$

$$W_{11}(P) = \frac{k_{11}(T_{11}P+1)}{(T_{11}P+1)T_{11}P+k_{11}}, \quad (3.2.38)$$

$$W_{\text{СКН}}(P) = \frac{k_{\text{СКН}}P}{T_{\text{СКН}}^2P^2+1}, \quad (3.2.39)$$

$$W_{\text{СТ}}(P) = \frac{k_{\text{СТ}}}{T_{\text{СТ}}P+1}, \quad (3.2.40)$$

$$W_{\text{СТС}}(P) = \frac{k_{\text{СТС}}}{T_{\text{СТС}}P+1}, \quad (3.2.41)$$

$$W_{\text{СМУ}}(P) = \frac{k_{\text{СМУ}}}{T_{\text{СМУ}}^2P^2+1}, \quad (3.2.42)$$

$$W_{\text{ДКН}}(P) = \frac{k_{\text{ДКН}}P}{T_{\text{ДКН}}^2P^2+1}, \quad (3.2.43)$$

$$W_{\text{ДТ}}(P) = \frac{k_{\text{ДТ}}}{T_{\text{ДТ}}P+1}, \quad (3.2.44)$$

$$W_{\text{ДТС}}(P) = \frac{k_{\text{ДТС}}}{T_{\text{ДТС}}P+1}, \quad (3.2.45)$$

$$W_{\text{ДМ}}(P) = \frac{k_{\text{ДМ}}}{T_{\text{ДМ}}^2P^2+1}, \quad (3.2.46)$$

$$W_{\text{ВЭ}}(P) = \frac{k_{\text{ВЭ}}}{T_{\text{ВЭ}}^2P+1}, \quad (3.2.47)$$

$$W_{\text{ИЭ}}(P) = \frac{k_{\text{ИЭ}}}{1+T_{\text{ИЭ}1}P+T_{\text{ИЭ}2}P^2}, \quad (3.2.48)$$

$$W_{\text{ДКВКТ}}(P) = \frac{k_{\text{ДКВКТ}}}{T_{\text{ДКВКТ}}P+1}, \quad (3.2.49)$$

$$W_{ЗВКТ}(P) = \frac{k_{ЗВКТ}}{T_{ДТС}P+1}, \quad (3.2.50)$$

$$W_{ЭС1}(P) = k_{ЭС1} \frac{T_{ЭС1}P+1}{T_7P+1}, \quad (3.2.51)$$

$$W_{ЭС2}(P) = k_{ЭС2} \frac{T_{ЭС2}P+1}{T_{ВКТ}P+1}, \quad (3.2.52)$$

На основе передаточных функций элементов структурной схемы функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, и, формирования управляющих воздействий определяются их конструктивные и режимные параметры.

3.3. Определение рациональных конструктивных и режимных параметров электротехнических и электромеханических систем

Основные элементы структурной схемы функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий находятся в сложной взаимозависимости, переходные процессы определяются как конструктивными, так и режимными параметрами. Зависимости между входными параметрами и выходными, а также оценочными показателями эффективности функционирования устанавливаются моделированием переходных процессов на основе двух способов решения уравнений движений, на основе которых определены их передаточные функции, где прямое решение методом Рунге-Кутты[23] и структурное моделирование в Matlab[2, 7, 12].

Решение методом Рунге-Кутты – конечно-разностная аппроксимирующая производных используется для определения

рациональных параметров новых технических решений для повышения эффективности функционирования электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, устанавливая порядок их точности, которая пропорциональна числу её элементов. В случае большого числа элементов соотношение становится более громоздким. Поэтому достаточно эффективным способом уточнения решения при фиксированном числе элементов структуры (рис.3.2.1), при использовании аппроксимирующих конечно-разностных соотношений, является метод Рунге-Ромберга из которого получена формула Рунге

$$F(x) = f(x, h) + \frac{f(x, h) - f(x, kh)}{k^{p-q_H-1}} + \Delta^m O(h^{p+k_y+1}) \quad (3.3.1)$$

позволяющая по результатам двух расчетов значений производной $f(x, h)$ и $f(x, kh)$ (шаг h и kh) с порядком точности p рассчитать рациональные параметры данной структуры(рис.3.2.1), где $f(x, h)$ - конечно-разностная аппроксимация уравнений движения – производной с шагом h ; k – коэффициент, и, с порядком точности их значения с точностью $p+1$. $\Delta^m O(h^{p+1})$ – разности нуля, являющиеся конечными разностями при $x=0$, $m < h$.

Поскольку расчет рациональных параметров структуры(рис.3.2.1) и функционально связан с её коэффициентом технического уровня k_y и требуемым уровнем надёжности q_H то порядок точности p позволит определить их уточненное значение с точностью порядка

$$k=p+k_y+1 \quad (3.3.2)$$

Причем для k_{q+1} должен учитываться требуемый уровень точности $k_q - q_H - 1$. Тогда, выражение принимает следующий вид:

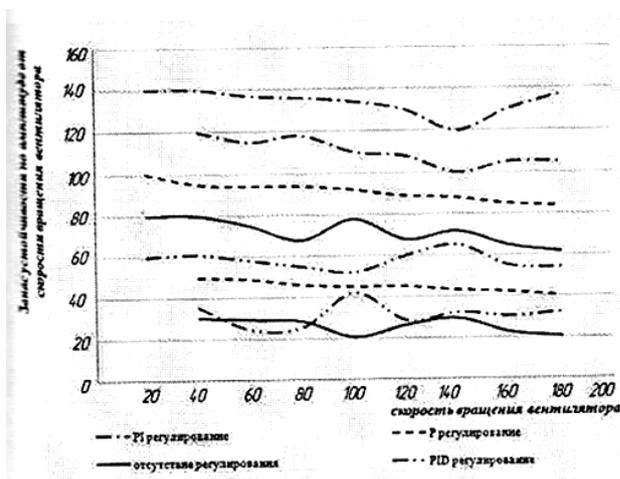
$$F(x) = f(x, h) + \frac{f(x, h) - f(x, kh)}{k^{p-q-1}} + \Delta^m O(h^{p+k+1}) \quad (3.3.3)$$

Структурное моделирование переходных процессов проводилось на основе уравнений движения и переходных функций (3.2.28-3.2.52) элементов структуры (рис.3.2.1) в Matlab, наиболее распространённом и удобном языке

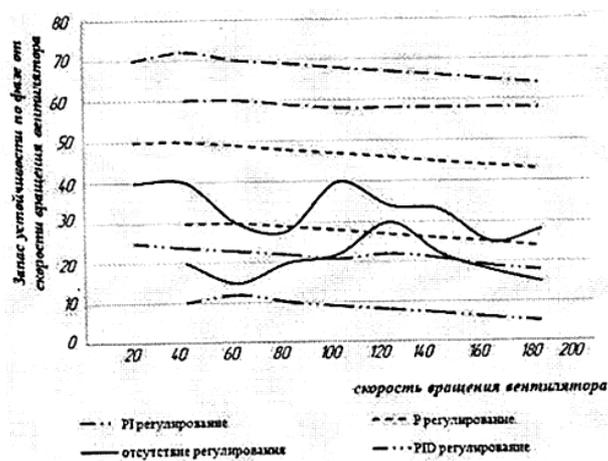
для технических вычислений, который реализован методом Дорманда-Принса[2, 7, 12].

Контур формирования управляющих воздействий установлен на подчинённое регулирование и настраивается на наибольшее быстродействие, чаще всего на оптимум по модулю.

Применение регуляторов P, PI, PID [108] для установленной структурной схемы определяет запас устойчивости по амплитуде, по фазе и времени регулирования, перерегулирование от скорости формирования управляющих воздействий и оценит качество регулирования. На рис.3.3.1 (а-б) представлены результаты моделирования на программе Matlab-Simulink.



а. запас устойчивости по амплитуде



б. запас устойчивости по формированию управляющих воздействий

Рис.3.3.1. Результаты применения регуляторов P, PI, PID

Анализ полученных результатов приводит к следующему выводу. Оценка запаса устойчивости и качество регулирования через время регулирования, установившееся значение и перерегулирование при использовании регуляторов P, PI, PID по закону регулирования наиболее оптимален P регулятор.

В результате численного эксперимента получили следующую осциллограмму. На рис.3.3.2 представлена зависимость момента РВЭД от

времени, из которой видно, что затраты энергии в реактивно-вентильных электродвигателях снизились на 25-30%.

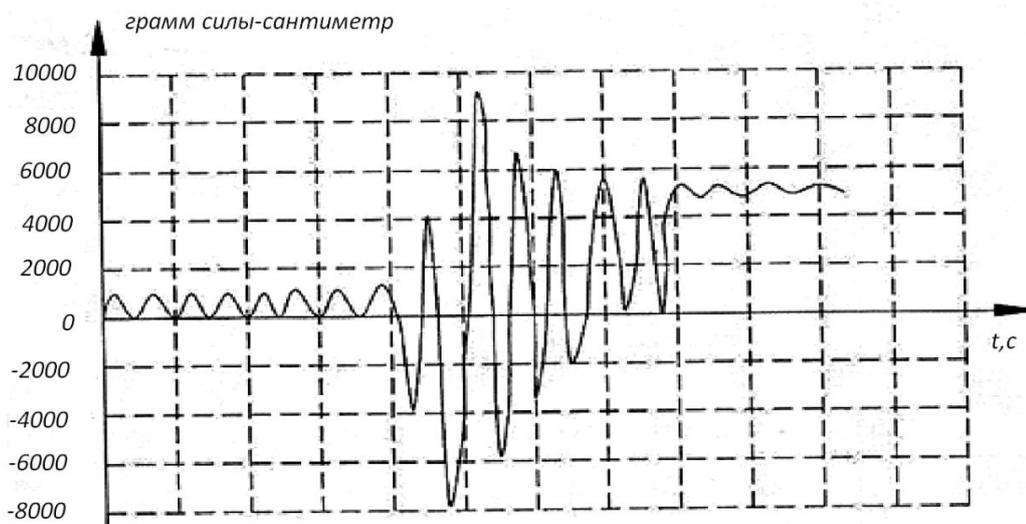


Рис.3.3.2. Зависимость момента РВЭД от времени

Поскольку наиболее энергоёмким элементом в системах балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов (рис.3.2.1 и см.1.1) являются затраты энергии на обеспечение элементов питания реактивно-вентильного электродвигателя комбинированного регулятора давления газа, то снижение энергоёмкости переходных процессов на 25-30% распространяется на всю конструктивную схему (рис.3.2.1).

3.4. Выводы

1. Разработаны новые технические решения электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий.

2. Определена топология и структура функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и

диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий.

3. Разработана структурная схема функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий, и, определены их передаточные функции.

4. Разработаны имитационные модели структуры функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов.

5. На основе исследования имитационных моделей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов определены их рациональные параметры.

6. Определена работоспособность электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и следящих систем управления режимами работы как систем, так и сетей на основе исследования их устойчивости, в результате которой установлена правильность разработанных новых технических решений и рассчитанных рациональных параметров, которые повышают эффективность функционирования до 25-30%.

7. Установлено, что наиболее эффективное управление режимами работы электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов обеспечивает применение Р регуляторов.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БАЛАНСИРОВКИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ И ИХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

4.1. Планирование эксперимента и аппаратуры исследований

Планирование эксперимента исследований соответствуют проведению исследований в производственных и лабораторных условиях.

В связи с возросшей сложностью и стоимостью заданных им свойств основано на минимуме расходуемых ресурсов числа испытаний, обеспечивающих получение требуемых показаний надёжности путем использования функциональной избыточности [106].

Выделяя параметр x , характеризующий работоспособность структуры функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов (рис.3.2.1), и, имея её предельное значение x^* получаем функцию распределения определяющего параметра $F(x)$ и условие работоспособности $x < x^*$ то оценка вероятности эффективности её функционирования имеет вид:

$$\hat{P} = F(\hat{h}), \quad (4.1.1)$$

где \hat{h} - квантиль нормированного распределения.

Нижнее значение вероятности безотказной работы

$$P = F(\underline{h}), \quad (4.1.2)$$

где \underline{h} - нижнее значение квантили, соответствующее заданной доверительной вероятности \hat{y} .

При нормальном законе распределения параметра x определяется минимальное число испытаний. Если значения x распределены не по

нормальному закону, то можно от параметра x перейти к параметру y , значение которого распределены по нормальному закону. В общем случае нижняя граница для квантили нормального определения:

$$\underline{h} = \underline{b}(n, \hat{y}, \hat{h})n^{1/2} \quad (4.1.3)$$

где $\underline{b}(n, \hat{y}, \hat{h})$ - нижняя доверительная граница для параметра δ нецентрального распределения Стьюдента; \hat{y} - уровень доверительной вероятности; n - число испытаний,

Для приближенных расчетов более удобно пользоваться равенством:

$$\underline{h} \cong \hat{h} - u_y n^{-\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{\hat{h}^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.1.4)$$

где u_y - квантиль нормального распределения, соответствующая уровню доверительной вероятности y .

Откуда

$$n \cong \frac{u_y^2}{(\hat{h} - \underline{h})^2} \left(1 + \frac{\hat{h}^2}{2}\right). \quad (4.1.5)$$

Зависимость (4.1.5) позволяет подтвердить высокую вероятность безотказной работы конструктивной схемы (рис.3.2.1) при наименьшем числе испытаний.

При наличии условия работоспособности:

$$y - x > 0, \quad (4.1.6)$$

где y - обобщенная прочность; x - обобщенная нагрузка;

$$\hat{h} = \frac{K_H - 1}{\sqrt{(v_1^2 K_H^2 + v_2^2 - 2rv_1 v_2)}}, \quad (4.1.7)$$

r - коэффициент корреляции между нагрузкой и прочностью; v_1 и v_2 - соответственно коэффициенты вариации прочности и нагрузки.

Подставляя в зависимость (4.1.5) выражение (4.1.7), имеем:

$$\frac{U_\gamma(\widehat{v}_1^2 \widehat{K}_H^2 + \widehat{v}_2^2 - 2\widehat{r}\widehat{K}_H \widehat{v}_1 \widehat{v}_2)}{[\widehat{K}_H - 1 - \underline{h}(\widehat{v}_1^2 \widehat{K}_H^2 + \widehat{v}_2^2 - 2\widehat{r}\widehat{K}_H \widehat{v}_1 \widehat{v}_2)^{1/2}]^2} \left[1 + \frac{(\widehat{K}_H - 1)^2}{2(\widehat{v}_1^2 \widehat{K}_H^2 + \widehat{v}_2^2 - 2\widehat{r}\widehat{K}_H \widehat{v}_1 \widehat{v}_2)} \right], \quad (4.1.8)$$

При $r = 0$ зависимость (4.1.8) примет вид:

$$n = \frac{U_\gamma^2(\widehat{v}_1^2 \widehat{K}_H^2 + \widehat{v}_2^2) \left[1 + \frac{(\widehat{K}_H - 1)^2}{2(\widehat{v}_1^2 \widehat{K}_H^2 + \widehat{v}_2^2)} \right]}{[\widehat{K}_H - 1 - \underline{h}(\widehat{v}_1^2 \widehat{K}_H^2 + \widehat{v}_2^2)^{1/2}]^2}. \quad (4.1.9)$$

Из зависимостей (4.1.5), (4.1.8) и (4.1.9) следует, что при большом числе испытаний подтвердить высокие значения вероятности безотказной работы конструктивной схемы (рис.3.2.1) можно только при больших значениях коэффициента K_H (рис.4.1.1)

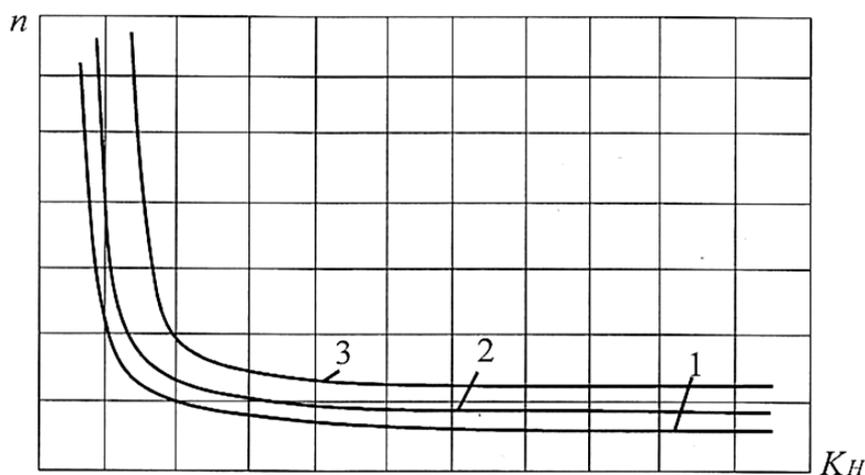


Рис. 4.1.1 Графики зависимости $n=f(K_H)$

Графики зависимости $n = f(K_H)$ для $U_\gamma = 1,28$, $v_1 = v_2 = 0,1$: 1 - $P = 0,99$; 2 - $P = 0,999$; 3 - $P = 0,9999$;

Уменьшение числа испытаний конструктивной схемы (рис.3.2.1) возможно за счет увеличения K_H . Однако уменьшить число испытаний, необходимых для подтверждения требуемого уровня надёжности за счет

увеличения K_H не всегда возможно и целесообразно. В общем случае должны учитываться затраты как на увеличение K_H , так и на увеличение n . Анализ полученных зависимостей при $v_1 = v_2 = v$ и $r = 0$, где:

$$n = \frac{K_H - 1}{v(1 + K_H^2)^{1/2}}, \quad (4.1.10)$$

А $\hat{h} = h$, показал, что можно найти минимальное значение коэффициента K_H , при котором подтверждается требуемый уровень надёжности. Получено уравнение:

$$K_H \cdot (1 - \underline{h}^2 v^2) - 2r - \underline{h}^2 v^2 + 1 = 0, \quad (4.1.11)$$

Откуда

$$K_H = (1 + \underline{h}v)^{-1}, \quad (4.1.12)$$

Представим зависимость (4.1.12) в виде

$$K_H = (1 - x)^{-1}, \quad (4.1.13)$$

где $x = \underline{h}v$ (рис.4.1.2), т.е. зная x определяется минимальное K_H , при котором подтверждается требуемый уровень надёжности при $n \rightarrow \infty$.

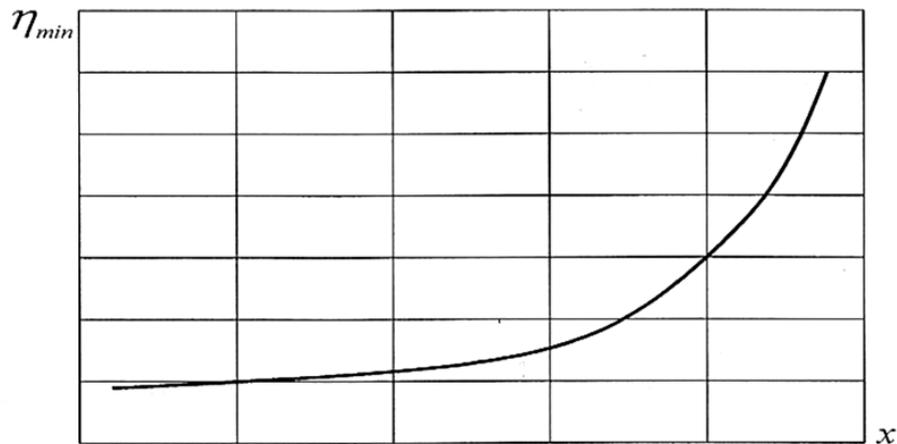


Рис.4.1.2 Графики зависимости $K_H = f(x)$ при $x = \underline{h}v$

Исходя из физического смысла K_H , значения x могут находиться в интервале $[0, 1]$. Поэтому для каждого v существует такое предельное h^* , которое невозможно превзойти ни при каких значениях K_H , т.е. для каждого v существует такое предельное значение вероятности безотказной работы P^* , которое нельзя подтвердить ни при каких значениях K_H

$$h^* = v^{-1} \quad (4.1.14)$$

Значение h^* является максимальным для h , получаемым при $K_H \rightarrow \infty$.
 Подставляя значения h в зависимость (4.1.5) вместо \hat{h} ($v_1 = v_2 = v$, $r=0$),
 получим минимальное n , при котором подтверждается требуемый уровень
 надёжности

$$n = \frac{u_{\gamma}^2(1 + 2v^2)}{2(1 - \underline{h}v)^2}, \quad (4.1.15)$$

где при $\underline{h}v \rightarrow 1$ число испытаний $n \rightarrow \infty$ (рис.4.1.3).

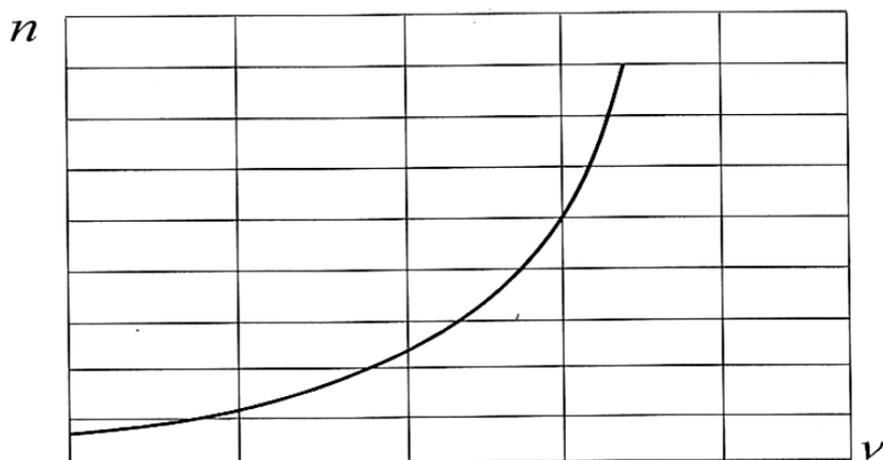


Рис.4.1.3 Графики зависимости $n = f(v)$ при $h = 2,3$ и $u_v = 1,28$

Кроме того

$$n = \frac{1 + 3(1 - p_H)^2}{(1 - p_H)^2}, \quad (4.1.16)$$

Приравнивая зависимости (4.1.15) и (4.1.16), получим

$$\hat{P}_H = 1 - \frac{1,42(1 - \underline{h}v^2)}{\sqrt{u_{\gamma}^2(1 + 2v^2) - 6(1 - \underline{h}v^2)^2}}, \quad (4.1.17)$$

где \hat{P}_H - минимальная вероятность, соответствующая требуемому уровню
 получения результатов испытаний.

В зависимости (4.1.1) - (4.1.17) и данные (рис. 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3)
 определен диапазон изменения $\hat{P}_H = 0,91 - 0,96$ которому соответствует
 минимальное число испытаний $n = 25-36$, и при непрерывной записи

процесса, интервал между точками отсчета выбирается из условия $\hat{P}_n = 0,92$, достаточности объема $n=103$.

Планирование эксперимента и предлагаемая методика соответствуют проведению в производственных условиях. Проводимые испытания основаны на теории подобия физических процессов и составления критериев подобия, обеспечивающих получение требуемого уровня эффективности функционирования на основе обоснования необходимого объема экспериментальных исследований.

Определить критерии подобия путем приведения уравнений математической модели конструктивной схемы (рис.3.2.1) на основе функциональных связей её элементов и устройств к безразмерному виду способом интегральных аналогов [22, 23].

В соответствии с третьей теоремой подобия, необходимым и достаточным условием подобия двух систем является пропорциональность сходимости параметров, входящих в однозначность, и равенство критериев подобия. В результате получим критерии, характеризующие энергетическую эффективность в зависимости от комбинации применяемых реактивно - вентильных электродвигателей, как наиболее энергоёмкого элемента конструктивной схемы (рис.3.2.1):

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \frac{u_{s\alpha}}{i_{s\alpha} \cdot R_s} = \frac{i_{s\alpha\infty}}{i_{s\alpha}}, \text{ где } i_{s\alpha} = \frac{u_{s\alpha}}{R_s} \\
 \pi_2 &= \frac{\psi_{s\alpha}(\theta, i_{s\alpha})}{i_{s\alpha} \cdot R_s \cdot t} = \frac{T_{\psi_{s\alpha}}}{t}, \text{ где } T_{\psi_{s\alpha}} = \frac{\psi_{s\alpha}(\theta, i_{s\alpha})}{i_{s\alpha} \cdot R_s} \\
 \pi_3 &= \frac{u_{s\beta}}{i_{s\beta} \cdot R_s} = \frac{i_{s\beta\infty}}{i_{s\beta}}, \text{ где } i_{s\beta} = \frac{u_{s\beta}}{R_s} \\
 \pi_4 &= \frac{\psi_{s\beta}(\theta, i_{s\beta})}{i_{s\beta} \cdot R_s \cdot t} = \frac{T_{\psi_{s\beta}}}{t}, \text{ где } T_{\psi_{s\beta}} = \frac{\psi_{s\beta}(\theta, i_{s\beta})}{i_{s\beta} \cdot R_s} \\
 & \quad i_{r\alpha} = i_{r\beta} = 0; \\
 \pi_5 &= \frac{-M_c}{M}; \quad \pi_6 = \frac{j \cdot \omega}{t \cdot M}; \quad \pi_7 = \frac{K_{nc}}{K_{nh}};
 \end{aligned} \tag{4.1.18}$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ - составляющие тока статора электродвигателей; $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ - составляющие тока ротора двигателей; $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ - составляющие напряжения статора электродвигателей; $\psi_{s\alpha}(\theta, i_{s\alpha})$, $\psi_{s\beta}(\theta, i_{s\beta})$ - составляющие потокосцепления статора электродвигателей; $\psi_{r\alpha}(\theta, i_{r\alpha})$, $\psi_{r\beta}(\theta, i_{r\beta})$ - составляющие потокосцепления ротора электродвигателей; t - составляющая критерия подобия; M - момент на валу электродвигателя; M_c - момент сопротивления, приводящий двигатель; $K_{нс}$, $K_{нн}$ - коэффициент надёжности существующего и нового технического уровня.

Полученные критерии $\pi_1 - \pi_7$ позволяют проследить динамику изменения критериев в зависимости от комбинации применяемых реактивно-вентильных электродвигателей в режиме балансировки газораспределительных сетей и выбрать рациональный, соответствующий максимальной эффективности и минимальным потерям электроэнергии. Подобная динамика позволяет сформировать топологию применения конструктивной схемы (рис.3.2.1), Задачей обоснования критериев является определение наиболее рационального его значения для определенной области применения конструктивной схемы (рис.3.2.1) на основе функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий с учётом зависимости параметров, характеризующих процесс работы.

4.2. Физическое моделирование электротехнических и электромеханических устройств балансировки газораспределительных сетей и их электрохимической защиты

На рис.4.2.1 представлен разработанный стенд и аппаратура экспериментальных исследований, которые содержат, датчик положения

регулирующего винта, трансформаторы и ЭВМ, которые работают как осциллограф и система автоматического управления. С помощью обработки все сигналы значения тока и напряжения из двигателя и сигнал из положений датчиков на стенде входят в ЭВМ, где разрабатывают сигнал управления РВЭД по требуемому углу для получения наибольшей мощности регулирующего винта комбинированного регулятора давления газа.

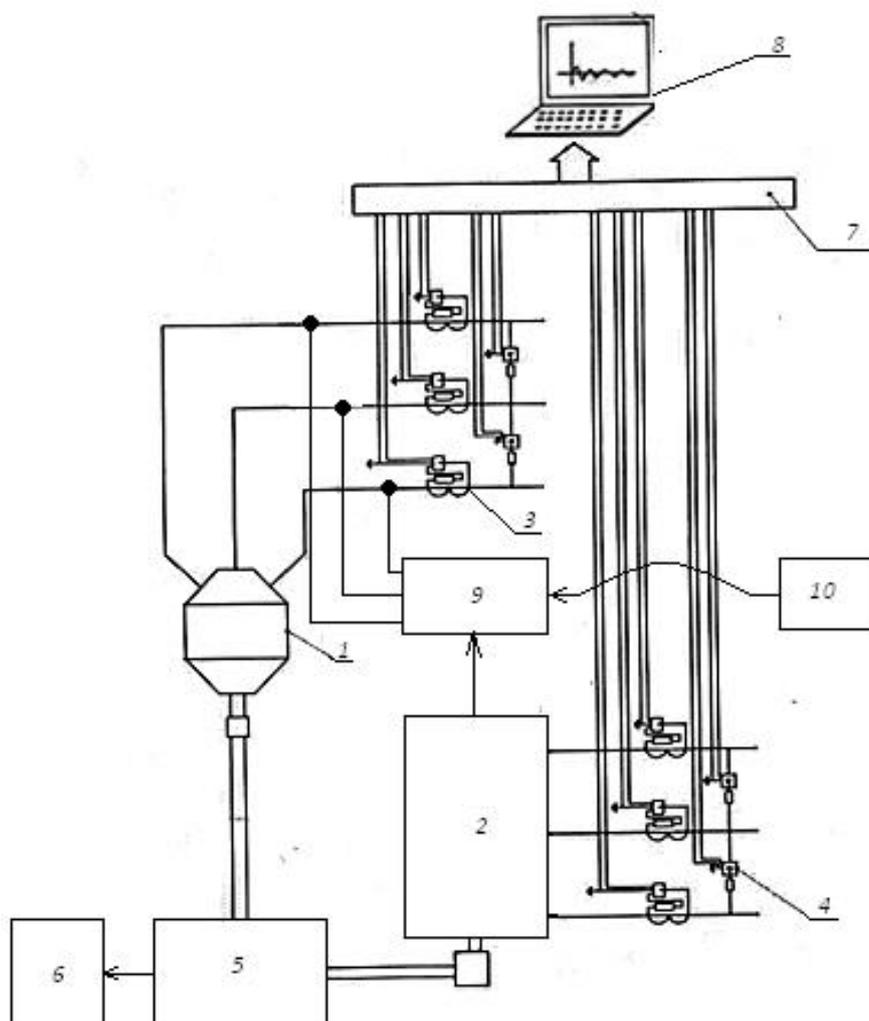


Рисунок 4.2.1. Стенд и аппаратура экспериментальных исследований 1 - главный РВЭД; 2 - формирование электрического сигнала датчика давления; 3 - трансформатор тока; 4- трансформатор напряжения; 5- комбинированный регулятор давления газа с исполнительным элементом; 6- газопровод с изоляцией, включающей «рабицу»; 7-обработка на ЭВМ; 8- ЭВМ; 9- элемент сравнения; 10- датчик давления.

На стенде установлено следующее основные электромеханические аппаратуры:

Измерение и регистрация параметров, предусмотренных методикой экспериментальных исследований, проводились с помощью измерительного комплекса построенного на базе ЭВМ CORE i3-2430M/2.40Gb/4G/Intel(R)HD, платы цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования L-791 фирмы L-CARD, датчиков измерения напряжения ДНХ, измерения тока CSNA111, измерения мощности ДИМ-200А и РВЭД.

Универсальная плата L-791 фирмы L-CARD для ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов в РС с возможностью их цифровой обработки в реальном времени. В качестве опции возможна установка ЦАП. Находящийся на плате сигнальный процессор осуществляет тактирование и синхронизацию работы АЦП и ЦАП, организует буферизацию и обмен данных с РС через двух портовое ОЗУ. Переключение каналов при многоканальном режиме сбора данных автоматическое, с произвольным порядком выборки канала и коэффициента усиления. Плата имеет милливольтный диапазон измерений. Возможна генерация прерываний по заполнению части FIFO-буферов АЦП и ЦАП.

На плате имеется один АЦП, на вход которого при помощи коммутатора может быть подан один из 16 или 32 аналоговых каналов с внешнего разъёма платы. На табл. 4.2.1 показаны параметры АЦП.

На плате установлен 2 ЦАП (таблица 4.2.2), который выдает постоянное напряжение в соответствии с записанным в него цифровым кодом.

На плате имеется возможность двухуровневого управления диапазоном напряжения для каждого канала АЦП. На каждый канал в процессе ввода можно устанавливать индивидуальный коэффициент усиления (1,2 или 5).

Таблица 4.2.1

Технические Параметры АЦП

Количество каналов	16 дифференциальных или 32 с "общей землей"
Разрядность АЦП	14 бит
Эффективная разрядность (вх. сигнал - синус 10 кГц / 4,9В)	13,3 бит (частота преобразования – 300 кГц)
Входное сопротивление при одноканальном вводе	Не менее 1 МОм
Поддиапазоны измерения входного сигнала	± 10 В, ± 5 В, $\pm 2,5$ В, $\pm 1,25$ В, $\pm 0,6$ В, $\pm 0,3$ В, $\pm 0,15$ В, $\pm 0,07$ В
Частоты дискретизации	До 400 кГц
Синхронизация	Внешний синхросигнал
Групповая гальваноразвязка	500 В
Защита входов	± 25 В (питание вкл.) ± 10 В (питание выкл.)
Межканальное прохождение	-70 дБ (входной сигнал - синус 10 кГц при выходном сопротивлении источника сигнала менее 1 кОм)
Отношение сигнал/(шум + нелинейные искажения) на частоте 400 Гц	74 дБ
Количество выходов напряжения с общей землей	2
Разрядность	12 бит
Время установления	8 мкс
Выходной диапазон	± 5 В
Выходной ток, не более	2мА

Таблица. 4.2.2

Параметры ЦАП

Тип ЦАП	Синхронный
Цифровые входы и выходы	
Количество входов	16 (параллельных, <u>синхронных, асинхронных</u>)
Количество выходов	16 (параллельных, <u>асинхронных</u> , с общим разрешением выходов)
Тип логики	КМОП (74 НСТ), TTL-совместимая
Габариты 167x120 мм	

При дифференциальном подключении обеспечивается подавление шумов, возникающих на соединительных проводах, на 74дБ. Каждый источник сигнала подключается к соответствующему каналу АЦП двумя проводами. Общий контур заземления проводится отдельным проводом.

ДНХ Датчик измерения постоянного и переменного напряжения (первичные преобразователи) компенсационного типа с гальванической развязкой входной и выходной цепи. Основным элементом датчика является кольцевой сердечник с зазором, внутри которого устанавливается специальный датчик Холла, служащий нульорганом системы измерения входного напряжения. Технические данные датчика измерения тока ДНХ показаны в таблице 4.2.3.

Датчик ДТХ-100 - это измерительный преобразователь тока на эффекте холла. Датчик измерения тока ДТХ-100 предназначен для измерения постоянного, переменного и импульсного токов с гальванической развязкой силовой цепи и цепей контроля. Датчик тока может быть использован в различных цепях телеметрии. Технические данные датчика измерения тока ДТХ-100 (таблица. 4.2.4).

Таблица 4.2.3

Технические данные датчика измерения напряжения ДНХ

Диапазон измеряемых напряжений	50... 600В
Номинальный входной ток	10мА
Нелинейность выходной характеристики, не более	0,1%
Основная приведенная погрешность, не более	1%
Начальный выходной ток, не более	0,2мА
Напряжение питания	$\pm(15 \pm 5\%)В$
Потребляемый ток, не более	60мА
Выходной ток	40мА
Пробивное напряжение между входной и измерительной цепями, не менее	3кВ
Габаритные размеры	73,5 x 52,5 x 39 мм
Диапазон температур	-20...+80°С
Диапазоны измеряемых напряжений	50В...600В
Масса датчика, не более	100г
Время установления рабочего сигнала, не более	1сек

ДТХ-100 состоит из замкнутого магнитопровода с зазором и обмоткой, датчика Холла и плата электронной, обработки сигнала.

Магниточувствительный датчик Холла закреплен в зазоре магнитопровода и соединен с входом электронного усилителя. При протекании измеряемого тока по силовой шине, охватываемой замкнутым магнитопроводом, в нем наводится магнитное поле. Датчик Холла, реагирующий на возникшее магнитное поле, вырабатывает напряжение Холла, пропорциональное измеряемому току.

Таблица 4.2.4

Основные технические характеристики ДТХ100

Характеристика	ДТХ 100
Диапазон измеряемых токов, А	0...100
Допустимая перегрузка по измеряемому току, разы	1,5-2
Диапазон рабочих температур, °С	-20...+70
Основная приведенная погрешность, не более, %	1
Нелинейность выходной характеристики, не более, %	0,1
Выходной сигнал при номинальном измеряемом токе, мА *	50
Коэффициент передачи	1:2000
Полоса пропускания, Гц	0-50000
Источник питания, В	±15 (±5%)
Диаметр отверстия под токовую шину, мм	10
Габаритные размеры, мм	44x33x22
Масса ДТХ 150, г	70 г

Выходной сигнал с датчика усиливается электронным усилителем и подается в компенсационную обмотку. По обмотке течет компенсационный ток, пропорциональный измеряемому току. Возникшее при этом магнитное поле компенсационной обмотки компенсирует магнитное поле измеряемого тока, и датчик Холла работает как нуль-орган.

Токовый выход датчика нагружается сопротивлением, чтобы получить напряжение, удобное для дальнейшей обработки.

Показатели надежности: средний срок службы при наработке 30000 часов не менее 12 лет. Вероятность безотказной работы за период 10000 часов >0.8 при доверительной вероятности 0.7, наработке щеток 0.8, коэффициенте готовности 0.9.

Для экспериментальных исследований переходных процессов в газопроводе с изоляцией, включающей «рабицу», связанных с оценкой эффективности применения электрохимической защиты в рамках конструктивной схемы (рис.3.2.1) с учётом критериев подобия использовался современный высокотехнологичный комплекс КМД-01М технологическая характеристика и составные части которого приведены в первой главе диссертации (см.1.2).

Обеспечивая контроль технического состояния изоляции и применив конструкционный материал, обладающий защитой от блуждающих токов и токов утечек, а также химической защитой, решается вопрос электрохимической защиты газопроводов.

4.3. Экспериментальные исследования

Разработана методика экспериментальных исследований соотношения мощностей электродвигателя регулировочного винта комбинированного регулятора давления газа, которая определяет критерии физической модели реальной установки.

Для снижения мощности электродвигателя во время пуска мы используем алгоритм управления ЭП, обеспечивающий как предварительную раскочку объекта, так и пуск привода на заданную скорость. [28]

На рисунке 4.3.1 представлена структура алгоритма управления ЭП. обозначим x как сигнал на управляющем входе ключа по скорости. Алгоритм работает следующим образом: Ключи функционируют по условиям:

$$k = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

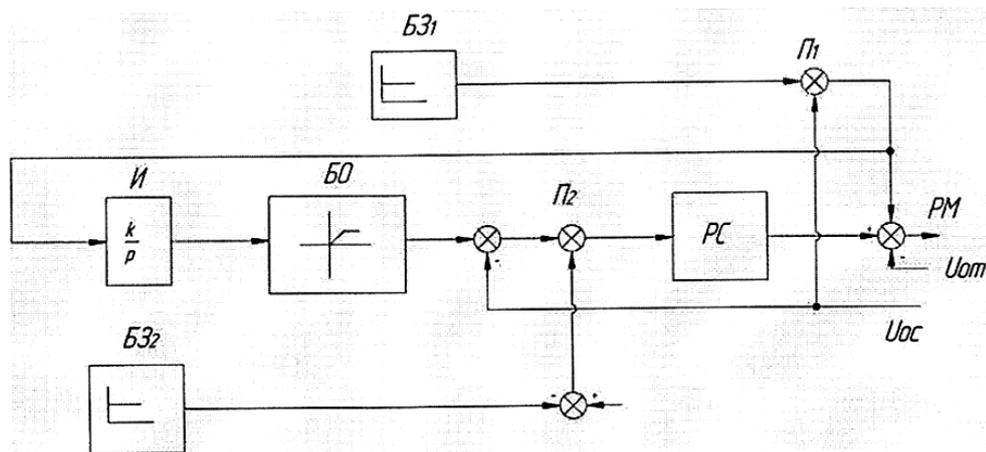


Рисунок 4.3.1. Структура алгоритма управления ЭП

Напряжение $U_{3МН}$ блока БЗ1 определяет интенсивность процесса «раскачки» дебаланса. Канал с блоком БЗ1 и П1 служит для управления процессом «раскачки» дебаланса что осуществляется через контура тока при разомкнутом контуре скорости. Когда дебаланс займет верхнее положение, замыкается переключатель и в работу вступает регулятор скорости РС. При этом пуск происходит под контролем замкнутого контура скорости, а интенсивность пуска и конечное значение скорости двигателя определяются интегратором И и блоком ограничения БО. Статическое значение скорости ЭП будет

$$\omega_{дс} = \frac{U_{эс}}{K_{ос}} \quad (4.3.1)$$

где $K_{ос}$ - коэффициент обратной связи по скорости.

На основании результатов исследований усовершенствована ЭМС комбинированного регулятора давления газа, эффективность которой была оценена в результате экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования усовершенствованной ЭМС проводились в лабораторных условиях на модели регулируемого ЭП, на кафедре Электроэнергетика, ТулГУ. Переходные процессы реальной установки фиксировались специально разработанной аппаратурой для оценки эффективности работы ЭП. Аппаратура, разработанная на базе ПЭВМ, включает аналогово-цифровой

преобразователь и комплект датчиков, обеспечивающих измерения мгновенных значения тока, напряжения и частоты вращения двигателя.

Производилась запись тока статора, изменение величины которого пропорционально изменению величины момента (рис.4.3.2) и угловой частоты вращения ЭП (рис.4.3.3). Сравнение результатов замеров и расчетов моделей показывает, что относительная погрешность не превышает 15%.

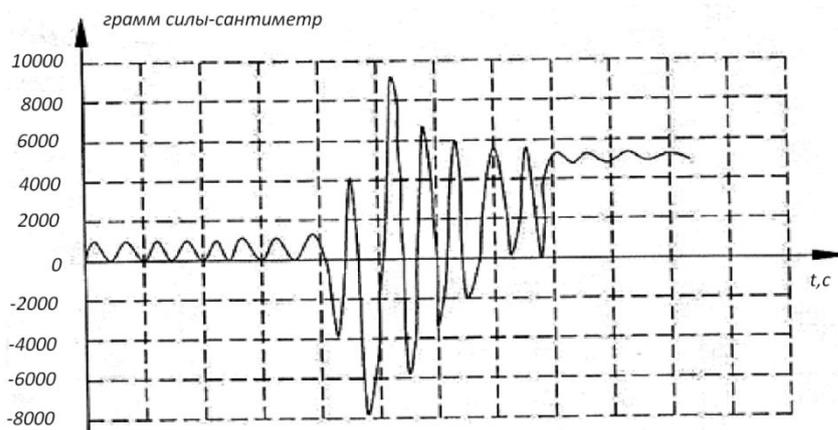


Рис.4.3.2. Зависимость момента РВЭД от времени

Из рис.4.3.2 видно, что момент РВЭД стабилизировался после не длинного пуска с номинальной угловой скорости 157 рад/с. Из этого мы можем сделать вывод о том, что мы снизили до 25% мощности электродвигателя.

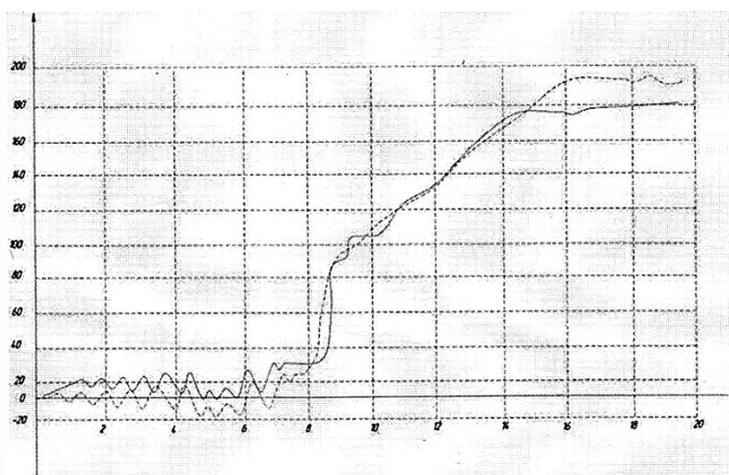


Рис.4.3.3. Зависимость скорости РВЭД от времени

-----расчетные, - - - -экспериментальные

Рассмотрение задачи определения рациональных параметров электромеханической системы ее трёхмассовости, колебательных процессов в исполнительном органе позволили получить увеличение производительности комбинированного регулятора давления газа в газопроводе и снижение энергозатрат.

Физическая модель электрохимической защиты газопроводов основана на том, что сдвигая потенциал металла пропусканием внешнего катодного тока, можно изменить скорость его коррозии (рис.4.3.4).

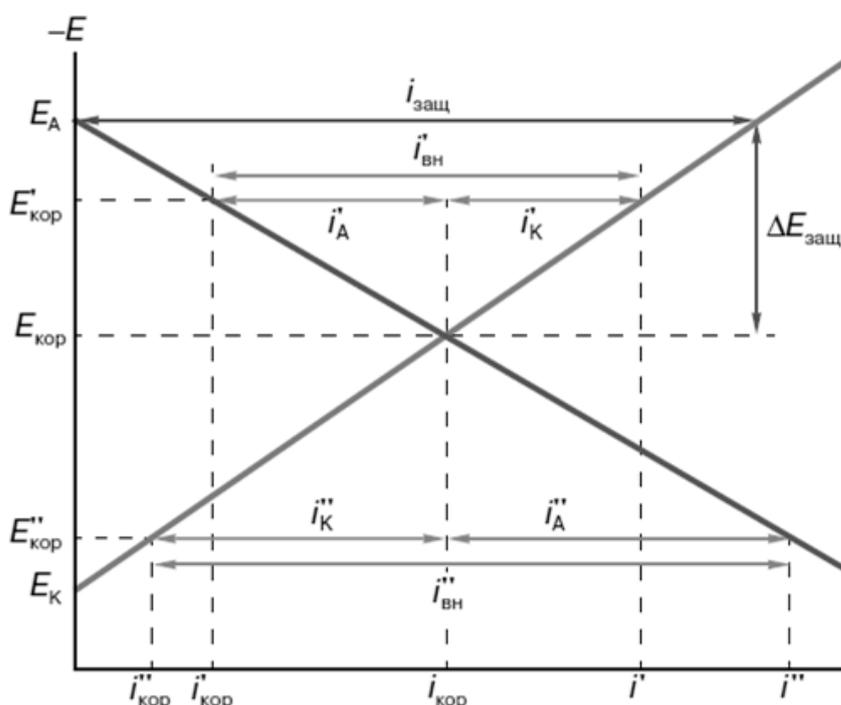


Рис.4.3.4. Коррозионная диаграмма в условиях наложения на металл внешних катодного $i'_{вн}$ или анодного $i''_{вн}$ токов. E_A и E_K – равновесные потенциалы соответственно для реакций ионизации металла и восстановления деполяризатора

Проекция точки пересечения кривой ионизации металла с катодной кривой восстановления деполяризатора на ось абсцисс дает ток коррозии $i_{кор}$ при отсутствии какого-либо внешнего воздействия на эту коррозионную систему, а проекция указанной точки на ось ординат - величину установившегося в этих условиях потенциала коррозии $E_{кор}$. При

пропускании через корродирующий металл внешнего катодного тока потенциал его сдвигается в отрицательную сторону и принимает новое значение $E'_{\text{КОР}}$. Скорость коррозии металла, определяемая соответствующим током на прямой ионизации металла при этом новом значении потенциала, равна $i'_{\text{КОР}}$.

Из диаграммы видно, что это состояние достигается при пропускании внешнего тока величиной $i'_{\text{ВН}}$. Причем часть этого тока $i'_{\text{А}}$ идет на подавление анодной реакции ионизации металла (то есть его коррозии), а другая часть $i'_{\text{К}}$ - на ускорение катодного процесса:

$$i'_{\text{ВН}} = i'_{\text{А}} + i'_{\text{К}} \quad (4.3.2)$$

Увеличение внешнего катодного тока до величины $i_{\text{ЗАЩ}}$, обеспечивающей достижение равновесного потенциала $E_{\text{А}}$ корродирующего металла, полностью подавляет коррозионный процесс (см. рис.4.3.4). Согласно теории подобия ток полной защиты $i_{\text{ЗАЩ}}$ в условиях коррозии с водородной деполяризацией

$$i_{\text{ЗАЩ}} = i_{\text{КОР}} \exp(\Delta E_{\text{ЗАЩ}} / v_{\text{К}}), \quad (4.3.3)$$

где $v_{\text{К}}$ - катодная поляризуемость корродирующего металла $\partial E / \partial \ln i_{\text{К}}$. Обычно $i_{\text{ЗАЩ}} > i_{\text{КОР}}$ для кислых сред. Создаются условия, в которых основная часть пропускаемого внешнего тока идет на ускорение выделения водорода и как следствие этого - ухудшению его механических свойств, отслаиванию защитных покрытий.

Для наиболее распространенного вида коррозии металлов с кислородной деполяризацией в условиях ограниченного доступа кислорода наложение внешнего катодного тока обеспечено эффективное предотвращение коррозии. Этот способ используется в физической модели при коррозии металлов, когда отсутствует поляризация анодных участков. В обоих случаях $i_{\text{ЗАЩ}} = i_{\text{КОР}}$ (рис.4.3.5).

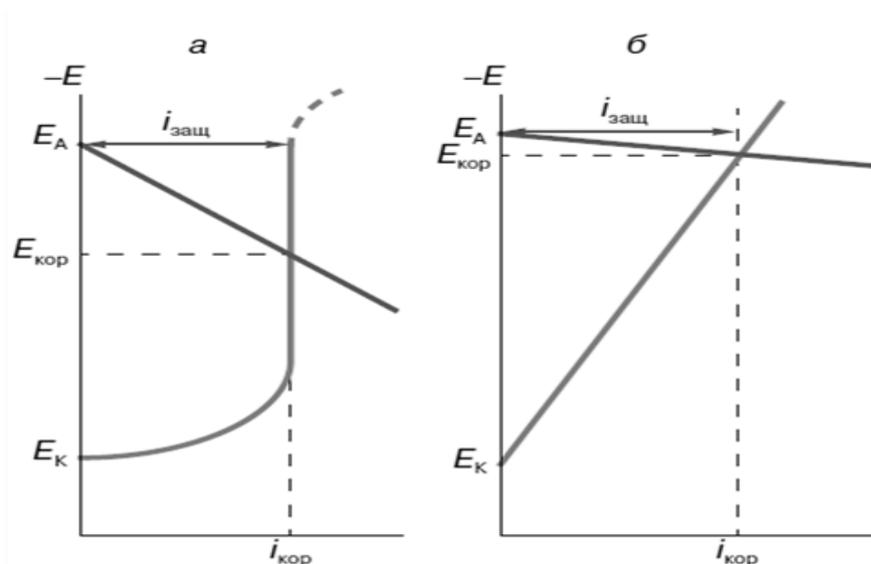


Рис.4.3.5. Коррозионные диаграммы при кислородной деполяризации катода на предельном токе (а) и слабополяризуемом аноде (б). Ток защиты равен току коррозии: $i_{защ} = i_{кор}$

Уменьшение скорости коррозии обеспечено до технически допустимой (0,025мм/год), если минимальное смещение потенциала при катодной поляризации относительно потенциала коррозии (стационарного потенциала без наложенного катодного тока – 0,55В) стали составило 300мВ. То есть, минимальный поляризационный (защитный) потенциал равен – 0,85В.

Катодная поляризация стальных газопроводов осуществлена таким образом, чтобы создаваемый на всей поверхности газопровода защитный потенциал был в интервале – 0,85... -1,15В, без учета омической составляющей.

При значении защитного потенциала менее минимального происходила неполная защита, т. е. возможна коррозия.

Обеспечена плотность тока катодной поляризации j и электрохимический потенциал исследуемого металла U , который связан графической зависимостью, называемой катодной поляризационной характеристикой $U = F(j)$, вид которой определяется множеством физико-химических факторов, проявляющихся на поверхности поляризуемого

электрода. На рис.4.3.6 приведена требуемая поляризационная характеристика исследуемой катодной поляризации.

Для стабилизации электрохимических процессов, измеряют стационарный потенциал исследуемого электрода $U_{ст}$, после чего, медленно или ступенями изменяли ток поляризации, снимая поляризационную кривую (рис.4.3.6).

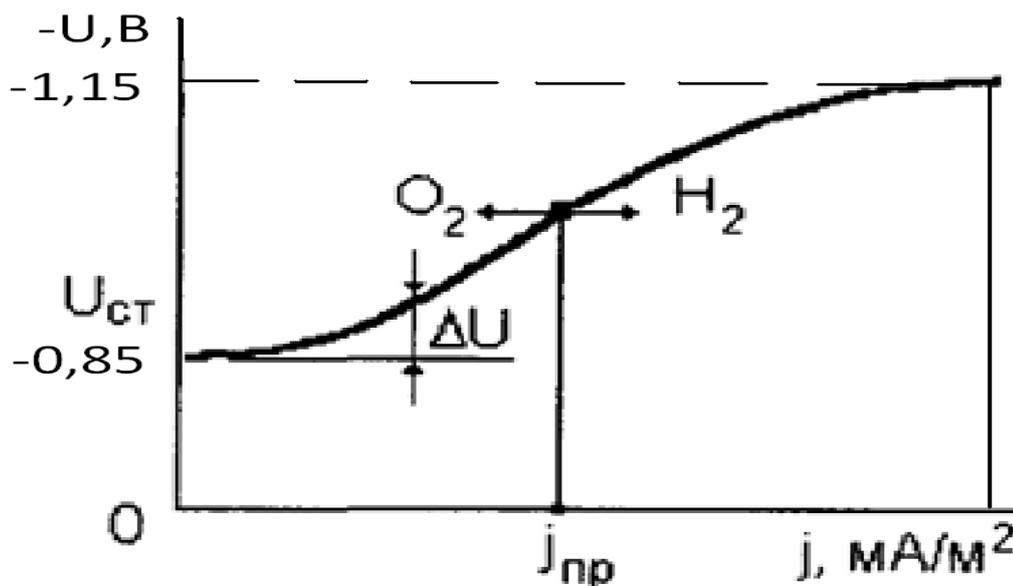


Рис.4.3.6. Требуемая катодная поляризационная характеристика газопровода с изоляцией и «рабицей»

Обеспечено катодное смещение ΔU - отрицательное приращение потенциала электрода относительно своего стационарного состояния $U_{ст}$.

Смещением потенциала обеспечено падение напряжения на поляризационном сопротивлении, т.е. $\Delta U = Rj$.

По мере удаления анода от защищаемого газопровода увеличивали необходимое напряжение защиты до 48В, что привело к улучшению распределения защитного тока.

Экспериментально установлено, что при соблюдении требуемого режима работы электрохимической защиты газопроводов с изоляцией и «рабицей» обеспечивается эффективная электрохимическая защита на расстоянии 30-50 метров в зависимости от условий формирования участков с

блуждающими токами и физико-химических характеристик почвы, что значительно по затратам ниже протекторной электрохимической защиты, позволяющей эффективно защищать стальные трубопроводы на расстоянии 30 метров, и, не обладают искро-взрыво-безопасным исполнением электрохимической защиты газопроводов. Причём дублёр стального газопровода – «рабица» - полностью обеспечивает его электрохимическую защиту (рис.4.3.7).

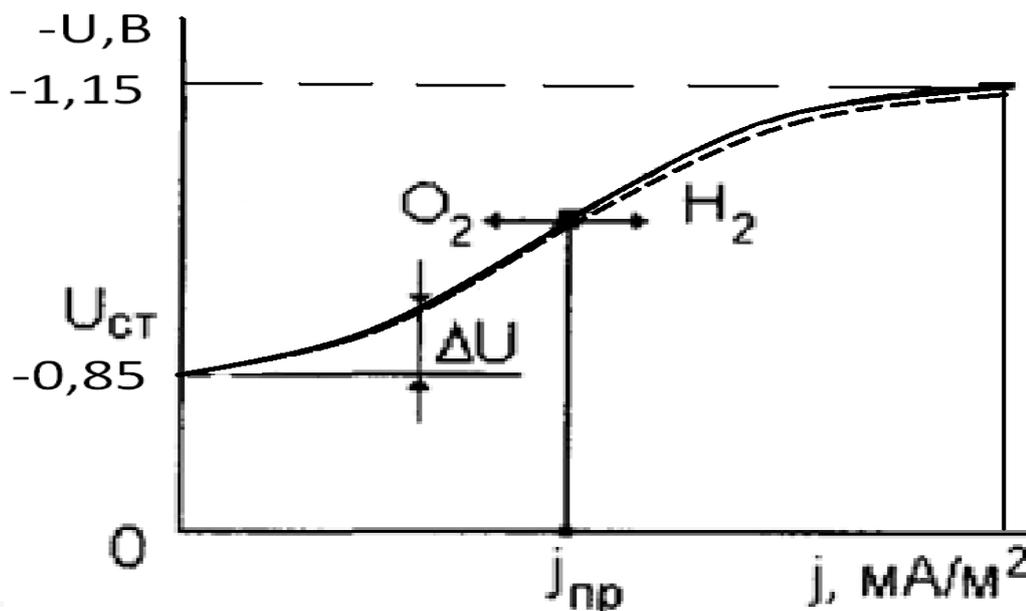


Рис.4.3.7. Экспериментальная катодная поляризационная характеристика:
 ————— стального газопровода,
 - - - - - газопровода с изоляцией и «рабицей»

Анализ инерционности системы контроля расхода и давления газа в газораспределительных сетях бесконтактным измерением температуры ИК (см.1.2 и 3.1), величина которой пропорциональна их величинам показали, что этот метод может быть использован для технологического контроля. Для балансировки газораспределительных сетей должны использоваться безинерционные датчики давления газа, расположенные рядом с комбинированным регулятором давления газа в газопроводе РДНК.

Сравнение результатов замеров при экспериментальных исследованиях и расчёто (рис.4.3.2, рис.4.3.3, рис.4.3.6, рис.4.3.7) показывает, что относительная погрешность не превышает 15%.

Разработана физическая модель конструктивной схемы, учитывающая функциональные связи электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий с учетом зависимостей параметров, характеризующих процесс работы, и, стенд для физического моделирования структуры управления ими, проведены экспериментальные исследования на основе критериев подобия и оценки правильности и эффективности результатов теоретических исследований и разработанных новых технических решений по их реализации, где эффективность достигла 20-30%, и, экспериментальные исследования подтвердили, что расхождения между расчётными и экспериментальными результатами исследований составили 14,5%, что допустимо в инженерных расчётах.

4.4. Выводы

1. Проведено планирование эксперимента и разработана методика экспериментальных исследований, обоснована и выбрана аппаратура для проведения исследований.

2. Разработаны физические модели электротехнической системы комбинированного регулятора давления газа с реактивно-вентильным электродвигателем и электрохимической защитой газопроводов и стенд для их реализации на основе критериев подобия и оценки правильности разработанных новых технических решений и определённых их рациональных параметров.

3. Экспериментальными исследованиями установлено, что для эффективного функционирования электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов они должны быть снабжены датчиками, установленными на расстоянии, обеспечивающем безинерционность функционирования как сетей, так и систем.

4. Экспериментально установлено, что при соблюдении требуемого режима работы электрохимической защиты газопроводов с изоляцией, включающей «рабицу», эффективно электрохимическая защита функционирует на расстоянии 30-50 метров в зависимости от условий формирования участков с блуждающими токами и физико-химических характеристик почвы.

5. Разработана физическая модель конструктивной схемы, учитывающая функциональные связи электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий с учетом зависимостей параметров, характеризующих процесс работы, и, стенд для физического моделирования структуры управления ими, проведены экспериментальные исследования на основе критериев подобия и оценки правильности и эффективности результатов теоретических исследований и разработанных новых технических решений по их реализации, где эффективность достигла 20-30%, и, экспериментальные исследования подтвердили, что расхождения между расчётными и экспериментальными результатами исследований составили 14,5%, что допустимо в инженерных расчётах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой поставлена и решена задача обоснования рациональных параметров конструктивных схем электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных характеристик, и формирования управляющих воздействий на основе структуры функциональных связей её элементов и функциональных модулей, и топологии управления ими, обеспечивающих снижение энергоёмкости, повышение надёжности и эффективности их функционирования.

1. Применение электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты обеспечивается путём комплексной диагностики их технического состояния, переходных процессов и режимных параметров.

2. Конструктивные схемы и параметры электротехнических и электромеханических устройств контроля технического состояния, переходных процессов и режимных параметров газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов комплексной системы диагностики учитывают физические процессы и их изменения и обеспечивают требуемый уровень чувствительности и разрешающей способности.

3. Определены функциональные связи электротехнических и электромеханических устройств систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, учитывающих в комплексе закономерности формирования их режимных параметров и характеристик технического состояния.

4. Разработана математическая модель формирования топологии и управляющих воздействий в электротехнических и электромеханических системах балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей на основе комплексной структуры диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, обеспечивающих требуемый уровень надёжности и эффективности функционирования систем и сетей, и, искровзрывобезопасного исполнения конструктивных схем.

5. Обоснованы рациональные параметры электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей для формирования требуемого уровня надёжности режимов работы и характеристик технического состояния газопроводов.

6. Установлены условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, обеспечивающих рациональные режимы работы систем и сетей, и, их технического состояния.

7. Разработаны методики определения рациональных параметров электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, структуры и топологии управления режимами работы газопроводов.

8. Численными и экспериментальными исследования режимов работы электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей установлено, что при применении разработанных новых технических решений обеспечивается эффективное управление переходными процессами при эксплуатации.

9. Определены закономерности формирования топологии, диагностики и управляющих воздействий электротехнических и

электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, а также условий реализуемости для расчёта их параметров, обеспечивающих требуемый уровень формирования режимов работы и переходных процессов в системах и сетях.

10. Определены зависимости для расчёта уровня показателей надёжности электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов в комплексе на основе функциональной связи с коэффициентом их технического уровня, учитывающим эффективность функционирования систем и сетей.

11. Определены показатели надёжности, соответствующие её уровню: вероятность безотказной работы $P_{\text{НМ}}$, время безотказной работы $T_{\text{НМ}}$; интенсивность отказов $\lambda_{\text{НМ}}$; среднее время наработки на отказ $T_{\text{ОНМ}}$; время восстановления $T_{\text{ВНМ}}$; вероятность безотказной работы с учётом восстанавливаемости $P_{\text{НМ}(V)}$; экономический показатель надёжности $k_{\text{ПНМ}}$; коэффициент эксплуатационных издержек $k_{\text{ИЗНМ}}$.

12. Получены условия реализуемости надёжности, определяемые свойствами и условиями работы конструкционных материалов электротехнических устройств контроля и управления в комплексе и соответствием их функциональных параметров условиям эксплуатации.

13. Разработаны новые технические решения электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий.

14. Определена топология и структура функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и

диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий.

15. Разработана структурная схема функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий, и, определены их передаточные функции.

16. Разработаны имитационные модели структуры функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов.

17. На основе исследования имитационных моделей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов определены их рациональные параметры.

18. Определена работоспособность электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и следящих систем управления режимами работы как систем, так и сетей на основе исследования их устойчивости, в результате которой установлена правильность разработанных новых технических решений и рассчитанных рациональных параметров, которые повышают эффективность функционирования до 25-30%.

19. Установлено, что наиболее эффективное управление режимами работы электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов обеспечивает применение Р регуляторов.

20. Разработана физическая модель конструктивной схемы, учитывающая функциональные связи электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий с учетом зависимостей параметров, характеризующих процесс работы, и, стенд для физического моделирования структуры управления ими, проведены экспериментальные исследования на основе критериев подобия и оценки правильности и эффективности результатов теоретических исследований и разработанных новых технических решений по их реализации, где эффективность достигла 20-30%, и, экспериментальные исследования подтвердили, что расхождения между расчётными и экспериментальными результатами исследований составили 14,5%, что допустимо в инженерных расчётах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. - М.: Наука, 1965. - 780 с.
2. Андриевский Б.Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке Matlab/Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков -СПб.: Наука, 2000. - 475 с.
3. Аракелян А.К., Афанасьев А.А. Вентильные электрические машины и регулируемый электропривод: В 2 кн. Кн. 1: Вентильные электрические машины. - М. Энергоатомиздат, 1997. - 509 с.
4. Аракелян А.К., Афанасьев А.А. Вентильные электрические машины и регулируемый электропривод: В 2 кн. Кн. 2: Регулируемый электропривод с вентильным двигателем. - М.: Энергоатомиздат, 1997. - 498 с.
5. Афанасьев А.А. Линейные преобразования переменных в теории вентильно-индукторного двигателя // Электричество. 2004. - № 4. - С. 27 - 35.
6. Бабак А.Г., Ваткин В.А., Пестерин В.А., Чихпяев В.А. Применение реактивного индукторного двигателя для привода движения электропогрузчика // Электроника и электрооборудование транспорта. 2004. - № 2.-С. 26-27.
7. Бабко Л.В. и др. Теория автоматического управления в примерах и задачах с применением Matlab, Учебное пособие / Сост. Бабко Л. В., Васильев В. П.,
- 8.Бычков М.Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода. Автореферат дис. доктора техн. наук. М., 1999.-38 с.
- 9.Голландцев Ю.А. Особенности проектирования микропроцессорных систем управления электрическими машинами. Сб. «Микропроцессорные системы управления технологическими процессами». Л.: ЛДНТП. 1985.
- 10.Голландцев Ю.А. Вентильный индукторно-реактивный двигатель, Электроприбор, 2003.

11. Гумилевский С.В. Повышение эффективности функционирования электромеханических устройств с управляемым реактором для мощных асинхронных электроприводов. Дис. кандидата техн. наук. Тула, 2013. - 89 с.
12. Дьяконов В.П. Matlab 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основные применения. Полное руководство пользователя. М.: СОЛОН-Пресс, - 2002. - 768 с.
13. Зацепина В.И. Зависимости показателей безотказности систем электроснабжения при возмущающих факторах // Энергообеспечение и строительство: сб. материалов III междунар. выставки - Интернет-конф., - Орел, 2009. - Т. 1. - С. 42-46.
14. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. Для вузов. - М.: Высш. Шк., 2001. - 327 с.
15. Красовский А.Б. Имитационные модели в теории и практике вентильно-индукторного электропривода: Автореф. дис. доктора техн. наук. М., 2004. - 40 с.
16. Красовский А.Б. Имитационные модели в теории и практике вентильно-индукторного электропривода: Автореф. дис. доктора техн. наук. М., 2004. - 40 с.
17. Красовский А.Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного электропривода // Электричество. 2003. - №3. - С. 35-44.
18. Кузнецов В.П., Лукьянец С.В., Крупская М.А. Теория автоматического управления. Конспект лекций. В 2 ч. Ч. 1 : Линейные непрерывные системы : учеб.-метод. Пособие. - Минск : БГУИР, 2007. - 132 с.
19. Кузнецов В.А., Матвеев А.В. Дискретная математическая модель вентильно-индукторного двигателя // Электричество. - 2000. - № 8. - С. 22-27.
20. Малафеев С.И., Захаров А.В. Математическая модель двухфазного вентильного индукторного двигателя // Электротехника. 2004. № 5. С. 31- 35.
21. Микеров А.Г. Управляемые вентильные двигатели малой мощности: Учеб. пособие / ГЭТУ. СПб., 1997.

22. Мустафаев Р.И., Набиев М.А., Гулиев З.А., Гаджибалаев Н.М. К аппроксимации кривой намагничивания // *Электричество*. - 2004. - № 5. - С. 47-50.
23. Мышенков В.И., Мышенков Е.В. Численные методы. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Ч.2, Московский государственный университет леса, М.: 2005, 109 с.
24. Нгуен Мань Туан, Нгуен Чонг Хай Основные достоинства реактивно-вентильных электродвигателей по сравнению с традиционными электродвигателями // *Известия ТулГУ. Технические науки*. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып.8. - С.184-187.
25. Остриков В.В., Уткин С.Ю. Сравнительный анализ схем силовых преобразователей для вентильно-индукторного электропривода массового применения // *«Приводная техника»*, 2000, № 4.
26. Пахомин С.А. Развитие теории практика проектирования энергосберегающих вентильно-индукторных электроприводов: автореф. Дис. Доктора тех. Наук. - Новочеркасск, 2001. - 40 с.
27. Петрушин А.Д., Янов В.П. Оптимизация режимов работы тягового вентильно-индукторного двигателя // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*, - 1999. № 3. - С.33-38.
28. Степанов В.М., Маркова Т.А., Серёгин И.Н. Различные подходы к оптимизации сложных электромеханических систем. Изд-во ТулГУ. 2005. 172 с.
29. Грязев М.В., Степанов В.М., Дмитриев В.В. Системный подход при формировании топологии и структуры измерений конструктивных параметров и управляющих воздействий для эффективного функционирования газопроводов // *Известия ТулГУ. Технические науки*. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. Вып.12 Ч.3. - С.64-70.
30. Ваганов М.А., Казаков В.И., Москалец О.Д. Системный подход в теории оптических спектральных измерений // *Датчики и Системы*. – М., Изд-во Сенсидат-Плюс, 2016. – Т.1. – С.10-15.

31. Шпиганович А.А. Автореферат диссертации. Надежности систем электроснабжения на базе информационно-аналитического анализа их функционирования – Липецк, 2015. – 40 с.
32. Тимонин Ю.Н. Автореферат диссертации. Обоснование рациональных параметров энергосберегающих электромеханических систем охлаждения силовых трансформаторов для повышения надежности их работы – Тула, 2012. – 20 с.
33. Дмитриев В.В. Анализ конструктивных схем электротехнических устройств и способов бесконтактного контроля технического состояния стальных газопроводов, их изоляции, электрохимической защиты и объема газа // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. Вып.12 Ч.3. - С.71-78
34. Саксон В.М., Сергеев А.Б., Проказин А.Б. Диагностика стальных трубопроводов методом бесконтактной магнитометрии // Мир измерений. – Москва, 2012. – Вып.6 – С.17-21.
35. Дубов А.А. Контроль технологических трубопроводов без снятия изоляции с использованием сканирующих устройств и метода магнитной памяти металла:[Электронный ресурс] //ООО «Энергодиагностика»,1992-2015.URL: <http://www.energodagnostika.ru/article-about-mmm-wihtout-removal-insulation.html> (дата обращения: 07.11.2016).
36. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Справочник. Книга первая. / Под общ.ред. Е.А. Шорникова – Санкт-Петербург: Изд-во Политехника, 2002 – 409 с.
37. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Справочник. Книга Вторая. / Под общ.ред. Е.А. Шорникова – Санкт-Петербург: Изд-во Политехника, 2004 – 411 с.
38. Специфика бесконтактного измерения температуры: [Электронный ресурс] / Московский Энергетический Институт. М., 2001-2015. URL: http://www.cbias.ru/terias/cont/div04/meth/prib_1/pribor/an_xx/an_32.htm(дата обращения: 07.11.2016).

39. Дмитриев В.В. Анализ факторов, влияющих на коррозионное состояние газопроводов, способов и средств контроля их электрохимической защиты // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. Вып.12 Ч.3. - С.78-81.
40. Диагностика газораспределительных систем:[Электронный ресурс] //ООО «Роспайп»,2008 - 2016. [URL:http://ros-pipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/montazh - i - remont - vodosnabzheniya – zhilykh - domov/diagnostika - gazoraspredeletelnykh - sistem](http://ros-pipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/montazh-i-remont-vodosnabzheniya-zhilykh-domov/diagnostika-gazoraspredeletelnykh-sistem) (дата обращения: 07.11.2016).
41. а.с. №171820, МПК⁸ G05D16/06, опубл. Бюл.№9,07.03.92
42. Пат. РФ №94975, МПК⁸ C23 F 13/00, Бюл. №16, 2009г.
43. Принцип электрохимической защиты. Катодная поляризация: [Электронный ресурс] / ООО «Завод газовой аппаратуры «НС» URL: <https://www.enes26.ru/forum/attachment.php?attachmentid=674&d=1434631912> (дата обращения: 30.05.2017).
44. Электрохимическая защита: [Электронный ресурс] / URL: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/5333.html> (дата обращения 31.05.2017).
45. Григорьев В.П. Защита металлов от коррозии // Соросовский Образовательный журнал №6,1999 – С.62-67.
46. Антропов Л.И., Макушин Е.М., Панасенко В.Ф. Ингибиторы коррозии металлов. Киев: Техника, 1981. 183 с.
47. Розенфельд И.Л. Ингибиторы коррозии. М.: Химия, 1977. 350 с.
48. Григорьев В.П., Экилик В.В. Химическая структура и защитное действие ингибиторов коррозии. Ростов н/Д: Изд-во Ростов. гос. ун-та, 1978. 184 с.
49. Улиг Г.Г., Ревя Р.У. Коррозия и борьба с ней. Л.: Химия, 1989. 456 с.
50. Колотыркин Я.М. Металл и коррозия. М.: Metallurgy, 1985. 88 с.
51. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защита металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 591 с.
52. Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. 3-е изд. / Ред. С. М. Рытов. - М.: Физматлит, 2007. - 656 с.

53. Тарасов К.И. Спектральные приборы. 2-е изд. - Л.: Машиностроение, 1977. - 367 с.
54. Беляков Ю.М., Павлычева Н. К. Спектральные приборы: учебное пособие. - Казань: КГТУ, 2007. - 203 с.
55. Клудзин В.Б. Акустооптические устройства обработки сигналов. - СПб. БГТУ, 1997. — 62 с.
56. Пат. 86734 РФ, МПК⁸ G 01 J 3/26. Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона / И. Н. Архипов, М. А. Ваганов, С. В. Кулаков и др. // Изобретения и полезные модели. - 2009. - № 25.-2 с.
57. Титчмарш Е. Введение в теорию интегралов Фурье. - М.: ОГИЗ, 1948. - 480 с.
58. Саюдов Л.В., Петров Ф.С. Линейные автоматические системы с переменными параметрами. - М.: Наука, 1971. - 325 с.
59. Заде Л., Дезоер Ч. Теория линейных систем: пер. с англ. - М.: Наука, 1970. - 704 с.
60. Moskaletz O.D. Classical and quantum approaches to power spectrum measurement by diffractive methods // Proceedings SPIE. - 1999. - Vol. 3900. - P. 297-308.
61. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции. 2-е изд. - М.: Наука, 1984. — 384 с.
62. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике: пер. с англ. - М.: Мир, 1971. - 495 с.
63. Vaganov M.A., Moskaletz O.D. Spectrum analysis of optical signals is based on the resonance phenomenon // Proceedings of SPIE Optics + Photonics 2011. Optics and Photonics for Information Processing IV, edited by Abdul A. S. Awwal, Khan M. Iftekharuddin, Scott C. Burkhart, Vol. 8134. - Bellingham, WA, 2011. - P. 81340C-1-81340C-10.
64. Соколовский А.А., Отчерцов А.В., Моисеев В.В. Оптоэлектронная измерительная система для удаленных аналоговых датчиков// Датчики и системы, 2015 - №12 - С.34-38.

65. Акбари Саба, Баранов А.М., Сомов А.С., Спирякин Д.Н. Автономный беспроводной датчик угарного газа с питанием от альтернативных источников энергии // Датчики и системы, 2016 - №2 - С.48-53.
66. Somov A., Baranov A., Spirjakin D. et al. Deployment and Evaluation of a Wireless Sensor Network for Methane Leak Detection // Sensors and Actuators A: Physical. - Nov. 2013. - Vol. 202. - P. 217-225.
67. Magno M., Boyle D., Brunelli D. et al. Extended Wireless Monitoring Through Intelligent Hybrid Energy Supply // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - Apr. 2014. - Vol. 61. - P. 1871-1881.
68. Akbari S. Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks Review // Proc. Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS). - 2014. - P. 987-992.
69. Dondi D., Bertacchini A., Brunelli D. et al. Modeling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - Jul. 2008. - Vol. 55. - P. 2759-2766.
70. Спирякин Д.Н., Тхамь Фонг Ку. Автономное беспроводное устройство для мониторинга концентрации СО // Датчики и системы. - 2015. - № 6. - С. 42-45.
71. Samotaev N., Ivanova A., Oblov K. et al. Wi-Fi wireless digital sensor matrix for environmental gas monitoring // Procedia Engineering. - 2014. - Vol. 87. - P. 1294-1297.
72. Somov A., Baranov A., Savkin A. et al. Energy-Aware Gas Sensing Using Wireless Sensor Networks // Wireless Sensor Networks Series: Lecture Notes in Computer Science. Vol. 7158. Gian Pietro Picco, Wendi Heinzelman, Ed. Berlin Heidelberg: Springer. - 2012. - P. 245-260.
73. Samotaev N., Ivanovo A., Oblov K, Vasiliev A. Wireless digital platform for environmental gas monitoring // Proc. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2015). - 2015. - P. 1-4.

74. Баранов А.М., Иванов М.А., Савкин А.В. и др. Беспроводной автономный датчик для мониторинга утечек горючих газов // Датчики и системы. - 2010. - №11, - С. 34-38.
75. Хитрово А.А. Оптоэлектронный газоструйный преобразователь// Датчики и системы, 2016 - №2 - С.54-57.
76. Ярин Л. П., Геншин А. Л., Кукес В. И. Термоанемометрия газовых потоков, - Л.: Машиностроение, 1983. - 200 с.
77. Беляев М.М., Хитрово А.А. Электрогазоструйное и газоструйноэлектрическое преобразование дискретных сигналов // Датчики и системы. - 2005. - № 2. - С. 44-50.
78. Костюков В.Н., Косых А.В., Науменко А.П., Завьялов С.А., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Беспроводная система мониторинга состояния оборудования// Датчики и системы, 2016 - №2 - С.36-41.
79. Хамов А.Л. Беспроводные решения Smart Wireless от компании Emerson для автоматизации технологических процессов // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2008. - № 5. - С. 57-59.
80. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. - М.: Машиностроение, 2002. - 224 с.
81. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР™ КОМПАКС®). - М.: Машиностроение. 1999. - 163 с.
82. Беспроводный интеллектуальный вибродатчик 5120. URL: <http://www.dynamics.ru/products/controllers-moduls-sensors/besprovodnyu-intellektualnyu-vibrodatchik-5120/> (дата посещения 31.05.2017).
83. Борисов П.А. Автореферат диссертации. Повышение эффективности функционирования электротехнических устройств контроля технического состояния кабельных линий при их трассировке – Тула, 2015. – 20 с.
84. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Учебное пособие. Томск. Издательство ТПУ, 2007.

85. Жежеленко В.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Саенко Ю.В., Нойбергер Н.А. Электромагнитная совместимость потребителей. Москва. Машиностроение, 2012.
86. В.М. Степанов, П.А. Борисов. Влияние электромагнитного поля кабельной линии с СПЭ-изоляцией на рост триингов в собственной изоляции//Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып.8. – С.175-180.
- 87.А.В. Коржов. Влияние электрического и магнитного полей силовых кабельных линий напряжением 6 (10)кВ на интенсивность частичных разрядов в изоляции при различных режимах эксплуатации. «Наука и техника» №1 (332), 2012.
- 88.П.А. Борисов. Модель электротехнического комплекса диагностики технического состояния силовых кабельных линий//Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып.12. Ч.2. – С.171-176.
- 89.П.А. Борисов. Водные триинги и принцип определения участков кабельной линии содержащих водные триинги при трассировке кабельных линий//Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып.12. Ч.2. – С.176-183.
- 90.А.С. Малиновский. Стохастически-детерминированное моделирование электрического триинга в полимерах: дис. ... канд. технич. наук / Малиновский А.С. – Томск, 2002.
- 91.Bing Jiang. Mobile monitoring of underground cable systems. MSEE. Univercity of Washington, 2003.
- 92.AbdelsalamMohamedElhaffar. Power transmission line fault location based on current travelling waves. Doctoral dissertation. Helsinki Univercity of technology, Espoo, 2008.
- 93.Беляев, А.В. Оценка остаточного ресурса электрооборудования с помощью экспертных систем / А.В. Беляев, Д.А. Климов // Юбилейный сборник научных трудов к 100-летию со дня рождения профессора Черкасского Владимира Михайловича - Иваново, 2005.

94. Гиберт, Д. П. Надежность электрической изоляции / Д. П. Гиберт – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 61 с.
95. Гонтарь Ю. Г. Влияние напряженности электрического поля на разрушение поверхностного слоя изоляционной конструкции / Ю. Г. Гонтарь, Д. В. Лавинский // Электротехника и электромеханика. – 2013. – №4. – С. 40-43.
96. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. - М.: Высшая Школа, 2001 -400с.
97. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Расчет заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ // Новости электротехники. 2007. №2(44). С.124-128.
98. Объем и нормы испытаний электрооборудования/Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, [с изм. и доп.] – М.: НЦ ЭНАС, 2002.
99. РАО ЕЭС РФ «Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ», РД 153-34.0-20.363-99.
100. Рыбалко В.В. Оценка качества системы технического обслуживания энергетических объектов / Exponenta. Pro №3. 2003. - С. 58 - 61.
101. Бесекерский В.А., Попов Е.П. – Теория систем автоматического управления. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Спб, Изд-во «Профессия», 2004. – 752 с.
102. Федосов Е.М. Частичные разряды в элементах электротехнических комплексов: дис. ... канд. технич. наук / Е.М. Федосов. – Уфа, 2009. – 136 с.
103. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink.
104. Грязев М.В., Степанов В.М., Дмитриев В.В. Эффективность функционирования электротехнических и электротехнологических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей: Монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017 - 126с.

105. Грязев М.В., Степанов В.М., Дмитриев В.В. Устройство регулирования давления газа в газопроводе: пат. РФ №173146, МПК⁸G05D16/06, 16/20, Бюл.№23, 2017г.
106. Степанов В.М. Обоснование технологических и конструктивных параметров гидрофицированных крепей на основе обеспечения надёжности их работы: Диссертация доктора техн. наук. Тула, 1994. – 557с.
107. Измерение магнитного поля соленоидов датчиком Холла: [Электронный ресурс] / URL: http://lycu1580.mskobr.ru/files/6_issl_mag_p_sol_dat_hol.pdf (дата обращения: 27.05.2017).
108. Нгуен МаньТуан. Автореферат диссертации. Повышение эффективности функционирования электромеханических систем шахтных вентиляторных установок с реактивно-вентильными электродвигателями – Тула, 2016. – 20 с.
109. Miller T.J.E. Switched reluctance motors and their control – Magna physics publishing and Clarendon press. Oxford, 1993.
110. Stephenson J.M., Blake R.J., “The Characteristics, Design and Applications of Switched Reluctance Motors and Drives”, Seminar 5, PCIM93, ND, June 1993.
111. Дмитриев В.В. Определение уровня надёжности и условий реализуемости электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и их электрохимической защиты // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. Вып.6 - С.68-72.
112. Дмитриев В.В. Расчёт показателей надёжности и режимных параметров эффективного функционирования электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и их электрохимической защиты // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. Вып.6 - С.82-85.
113. Дмитриев В.В. Разработка структуры функциональных связей в электротехнических и электромеханических системах балансировки и электрохимической защиты // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. Вып.6 - С.103-108.