

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.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном общеобразовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ).

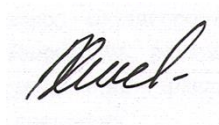
Научный руководитель:	Грязев Михаил Васильевич, доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Мещеряков Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» заведующий кафедрой «Электропривода» Борисов Павел Андреевич, кандидат технических наук, ООО «ПОПГН «Интеграл» г. Тула инженер-проектировщик по электроснабжению
Ведущее предприятие:	Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Защита диссертации состоится 27.12.2017 в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.12 на базе Федерального государственного бюджетного общеобразовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г.Тула, пр. Ленина, 92, ауд.9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета и на сайте <http://tsu.tula.ru/>

Автореферат разослан 26.10.2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Хмелёв
Роман Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА 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%.

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 выполнения диссертационной 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.

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.

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.

На защиту выносятся:

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 систем 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.

Практическая значимость результатов работы. 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 1500000 рублей в год.

Реализация результатов работы.

Основные научно-практические результаты диссертационной работы использованы в «Программе – Перспективном плане технического развития газораспределительных систем АО «Газпром газораспределение Калуга» до 2020 года».

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 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 диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 113 наименований, содержит 50 рисунков и 5 таблиц. Общий объём – 134 страницы.

Личный вклад автора. Разработаны топология и математические модели электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей и структура их функциональных связей, и, установлены зависимости для определения их рациональных параметров и закономерностей формирования в них управляющих воздействий, обоснованы контактные

и бесконтактные способы диагностики технического состояния и режимов работы как систем, так сетей, и, условие реализуемости конструкционной и функциональной надёжности, обеспечивающие требуемый уровень эффективности их функционирования и рациональных режимов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, решению которых посвящена диссертация, излагаются подход и методы исследования, отмечаются научная новизна, практическая значимость работы, а также апробация работы, приведена структура диссертации.

В первой главе проведён анализ конструктивных схем электротехнических и электромеханических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, физических процессов в системах и сетях, методов моделирования в них переходных процессов и расчёта режимных параметров, контактных и бесконтактных способов диагностирования как систем, так и сетей, условий их эксплуатации.

Учитывая, что распределительный газопровод находится под редуцированным, но достаточно большим внутренним давлением, наличие зон концентрации напряжений (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.

Отсутствие функциональных связей в системах балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей в комплексе не позволяет в полной мере эффективно оценить и управлять как техническим состоянием, так и режимами работы систем и сетей.

Необходимо разработать новые технические решения электротехнических и электромеханических устройств балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, обеспечивающих в комплексе повышение эффективности функционирования как систем, так и сетей путем разработки их топологии, структуры функциональных связей, математической модели и установления зависимостей для определения рациональных параметров и закономерностей формирования в них управляющих воздействий, условий реализуемости конструкционной и функциональной надёжности, соответствующих требуемому уровню эффективности их функционирования и управления режимами работы.

Во второй главе разработана структура функциональных связей электротехнических и электромеханических устройств в системах балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей, которая обеспечивает эффективный контроль, диагностику, управление и функционирование в комплексе на основе использования информационной, структурной и временной избыточности.

Формирование управляющих воздействий распределением контролируемых параметров и эффективностью использования электротехнических устройств контроля и управления устанавливается на основе нейронной сети, которая 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, что позволило получить их цифровую модель.

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 MatLabSimPowerSystems.

На рис. 1 изображена структура измерительно-информационного- управляющего модуля – ИИУМ, который включает датчики измеряемых параметров системы диагностики $D_1...D_N$, коммутатор К, через который 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.

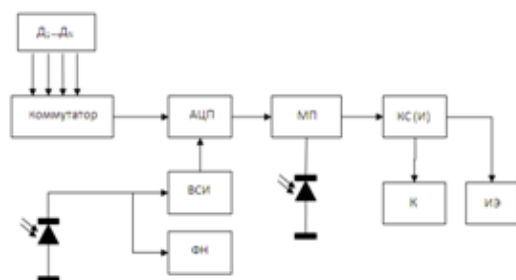


Рис. 1. Структура измерительно-информационного-управляющего модуля

Рациональная структура функциональных связей конструктивной схемы (рис.1) обеспечивает в комплексе требуемый уровень эффективности функционирования систем диагностики, электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов, на основе которой разработана их топология на уровне новых технических решений, и, определён уровень и условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности.

Требуемый уровень надёжности определяет вероятность отказа, соответствующая требуемому техническому уровню:

$$q_n = \frac{q_c}{k_y}, \quad (1)$$

где q_n , q_c - вероятности отказа системы существующего и нового технического уровня; k_y – коэффициент технического уровня.

Коэффициент технического уровня определяется следующей зависимостью

$$k_y = \frac{1}{5} \left(\frac{V_{Kc}}{V_{Kn}} + \frac{V_{OTc}}{V_{OTn}} + \frac{N_{Pc}}{N_{Pn}} + \frac{\Delta P_{Oc}}{\Delta P_{On}} + \frac{N_{OKc}}{N_{OKn}} \right), \quad (2)$$

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.

Условия реализуемости конструкционной и функциональной её надёжности имеют вид:

$$\frac{k_{\Pi}^3}{k_m^2 k_o^2} F_{\partial}^2 \leq F_H^2 ; \quad \frac{t_{\partial n} T_{OC}}{T_{OH}^2} \leq q_{HM} \quad (3)$$

где F_{∂} – действующие усилие на элемент конструкции; F_H – нормативная нагрузка на элементы конструкции; T_{OC} , T_{OH} – среднее время наработки на отказ существующих систем и нового технического уровня; $t_{\partial n}$ – допустимое время простоя.

Исходя из структуры взаимосвязанных элементов электротехнических и электромеханических устройств системы балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и равной вероятности анализов по общеизвестным зависимостям структурной надёжности установлена требуемая их вероятность отказов $q_H = q_i(\phi_i)$ и уровень показателей конструктивной и функциональной надёжности (табл.1)

Таблица1

Показатель надежности	q_{HM}	P_{HM}	λ_{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	$k_{ТИМ}$	$P_y(t)$	k_{Π}	K_H	k_m	K_0	$t_{МП}$	$k_{ММ}$
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

В третьей главе разработаны новые технические решения, реализующие топологию электротехнических и электромеханических устройств систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов на основе рациональной структуры функциональных связей конструкционной схемы рис.1 и обобщенная структура их функциональных связей.

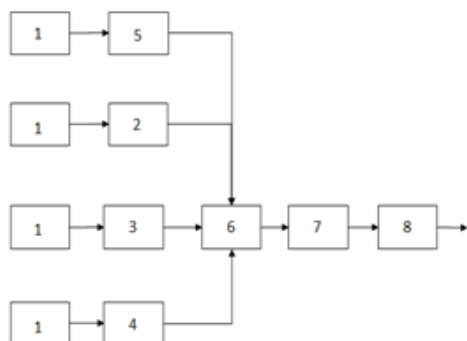


Рис.2. Устройство контроля технического состояния и режимных параметров газопроводов

На рис.2 представлена схема устройства контроля технического состояния и режимных параметров газопроводов. В состав устройства входят: 1 - сканирующие устройства; 2 - датчик концентрации напряжения; 3 - датчик температуры; 4 - датчик контроля толщины стенки трубы газопровода; 5 - магнитометрический датчик; 6 - аналого-цифровой преобразователь; 7 - интерфейс; 8 - компьютер.

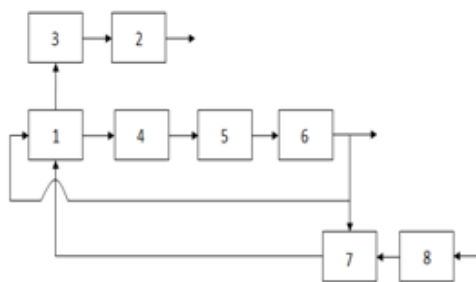


Рис.3. Устройство регулирования давления газа в газопроводе

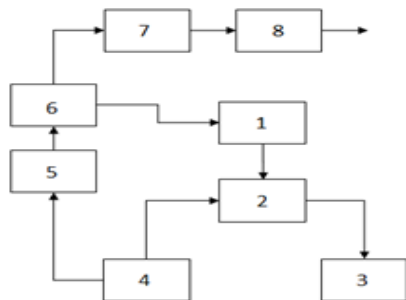


Рис.4. Устройство управления электрохимической защитой газопроводов

На рис.3 представлена схема устройства регулирования давления газа в газопроводе. В состав устройства входят: 1 - аналого-цифровой преобразователь с микропроцессором; 2 - компьютер; 3 - интерфейс; 4 - реактивно-вентильный двигатель; 5 - регулировочный винт комбинированного регулятора давления; 6 - датчик давления; 7 - блок сравнения; 8 - датчик давления газопровода.

На рис.4 изображена схема устройства управления электрохимической защитой газопроводов. В состав устройства входят: 1 - источник питания; 2 - усиленная-скрепляющая сетка «рабица»; 3 - вспомогательный электрод-анод; 4 - измерительный электрод; 5 - датчик контроля внешнего катодного тока; 6 - аналого-цифровой преобразователь; 7 - интерфейс; 8 - компьютер.

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 MatLabSimPowerSystems, в результате которого получена обобщенная структурная схема (рис.5).

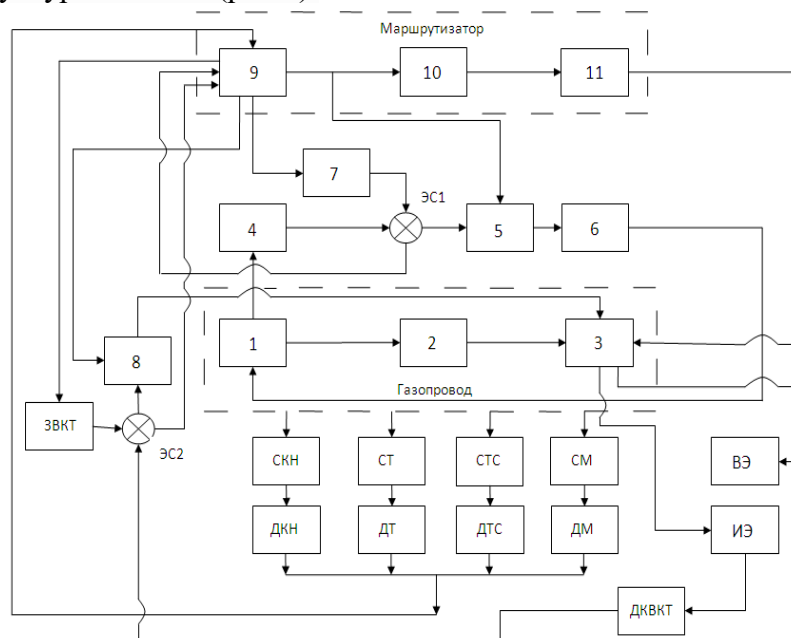


Рис.5. Обобщённая структурная схема функциональных связей электротехнических и электромеханических систем балансировки газораспределительных сетей и электрохимической защиты газопроводов и диагностики их технического состояния и режимных параметров, и, формирования управляющих воздействий.

В состав обобщённой структурной схемы (рис.5) 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 контроля внешнего катодного тока; 3ВКТ - задатчик внешнего катодного тока; ЭС1, ЭС2 – элементы сравнения.

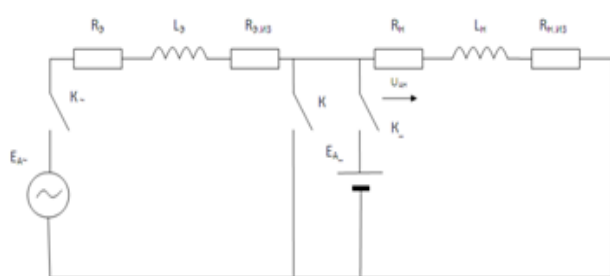


Рис. 6. Обобщенная однофазная эквивалентная схема замещения

На основе анализа топологии (рис.2-рис.5) и конструктивных схем электротехнических и электрохимических систем балансировки и электрохимической защиты газораспределительных сетей установлено, что дифференциальное уравнение, связывающее ток и падение напряжения в них соответствует одной фазе и обобщённой однофазной эквивалентной схеме замещения (рис.6).

В данном случае, амплитуда синусоидальной компоненты тока при замкнутом K_1 и к моменту замыкания K (рис. 6)

$$J_m(0) = \frac{U_m}{\sqrt{(R_K + R_H)^2 + \omega(L'_K + L'_H)^2}}, \quad (4)$$

а активное сопротивление R_{20} при 20°C

$$R_t = R_{20} e^{\alpha(t - 20)}, \quad (5)$$

$$t = \frac{R_t}{R_{20} e^{\alpha}} - 20, \quad (6)$$

где α - температурный коэффициент сопротивления; t – температура.

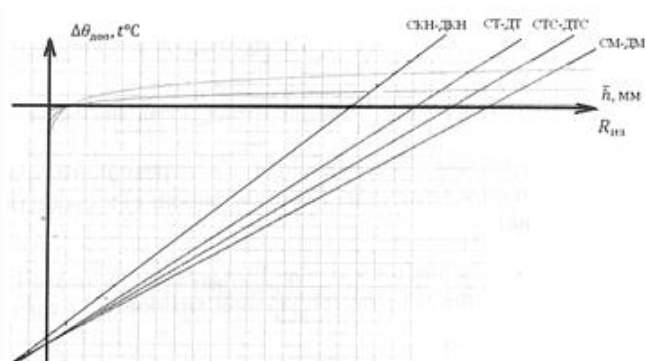


Рис. 7. Уровни совместимости

На основании (5) 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. 7).

Разработанный регламент диагностики технического состояния газораспределительных сетей и режимных параметров газопроводов с учётом совместимости и требуемых уровней надёжности (рис.7) показывает, что частота контроля должна быть не реже одного раза в 0,5 – 2 года.

Управление электрохимической защитой газораспределительных сетей обеспечено реализацией поляризационной коррозионной диаграммы (рис.8) и системой электродов, образующих коррозионный элемент, который поляризуется катодно подключением дополнительного электрода (от внешнего источника тока, рис.4), т.е. получением трёхэлектродной системы.

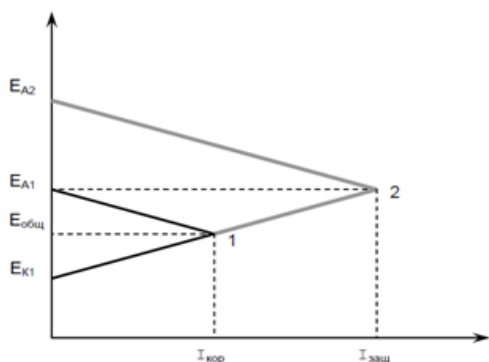


Рис. 8. Поляризационная коррозионная диаграмма, объясняющая механизм электрохимической защиты

На рис. 8: 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.

Для прекращения работы коррозионной пары E_{K1} - E_{A1} при управлении, 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. 8) следует, что ток защиты всегда должен быть больше коррозионного тока.

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.

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

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

Увеличение внешнего катодного тока до величины обеспечивающей достижение равновесного потенциала полностью подавляет коррозионный процесс. Это позволяет управлять электрохимической защитой газопроводов.

Математическая модель электромеханической системы комбинированного регулятора давления газа с реактивно-вентильным двигателем (рис.9) представляет собой структуру, масса которой распределена определенным образом в ее элементах, а звенья связей между элементами обладают упругими и диссипативными свойствами. Расчетная схема механической части системы с электродвигателем представлена как трехмассовая система:

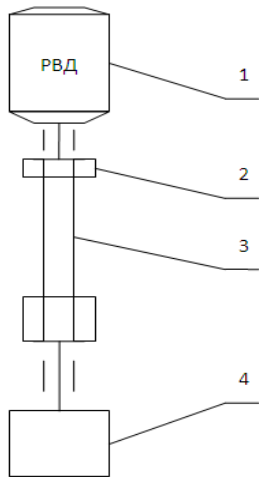


Рис. 9. Расчетная схема электромеханической системы

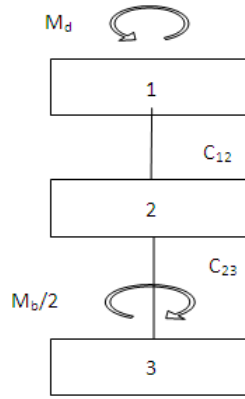


Рис. 10. Расчетная схема, приведенная к валу ротора

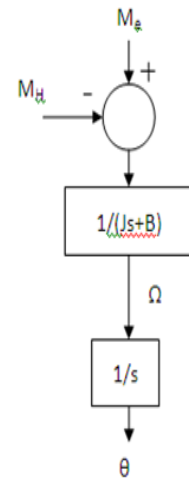


Рис. 11. Моделирование механических характеристик двигателя и нагрузки

На рис.9: 1 - приводной электродвигатель, 2,3 - опорные устройства для регулировочного винта(РВ), 4 - исполнительный элемент

В общем виде модель описывается дифференциальными уравнениями вида:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = M_d - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - \mu(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2), \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \mu(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) - \mu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3), \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 = c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + \mu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - \frac{M_b}{2} \end{cases} \quad (7)$$

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.

Механические динамика двигателя и нагрузки регулируются уравнения движения и структура показана на рис.11.

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

$$M - (M_{21} - M_{13}) = J_1 p \omega_1 \quad M_{21} - M_{c2} = J_2 p \omega_2 \quad -M_{13} - M_{c3} = J_3 p \omega_3 \quad p M_{21} = C_{21}(\omega_1 - \omega_2) \quad (8)$$

$$p M_{13} = C_{13}(\omega_3 - \omega_1) \quad U_j = R_j i_j + \frac{d\psi_j(\theta, i_j)}{dt} \quad M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{nr}$$

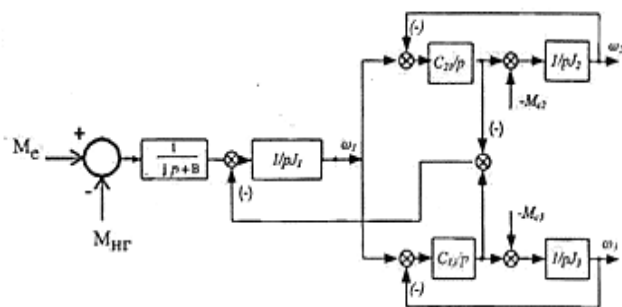


Рис.12. Структурная схема ЭМС с реактивно-вентильным электродвигателем.

Систему уравнений (8) можно представить в виде структурной схемы (рис.12).

Исследование разработанной математической модели проводилось на ПЭВМ с помощью пакета программ Matlab-Simulink.

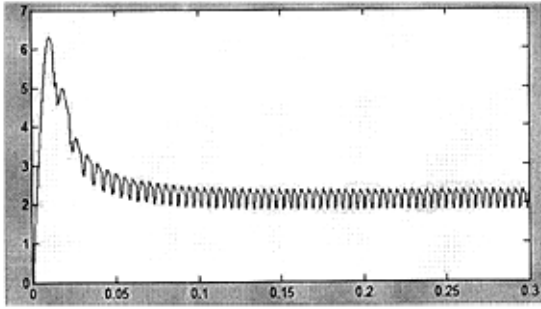


Рис.13. Электромагнитный момент в прямом и обратном режимах

На рис.13 представлены результаты моделирования переходных процессов реактивно-вентильного электродвигателя, работающего в прямом и обратном режимах, из которых следует, что повышение эффективности функционирования структуры математической модели может быть достигнуто за счет введения в следящую систему идентификатора угла, что обеспечит повышение точности позиционирования регулировочного винта.

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:

$$\begin{aligned}
 W_1(P) &= k_1, W_2(P) = k_2, W_3(P) = k_3, W_4(P) = \frac{k_4}{T_4+1}, W_5(P) = \frac{k_5}{T_5P+1}, W_6(P) = \frac{k_6}{T_6P+1}, \\
 W_7(P) &= \frac{k_7(T_7P+1)}{(T_7P+1)k_7k_6}, W_8(P) = \frac{k_8}{T_8P^2+1}, W_9(P) = \frac{k_9(T_9P+1)}{(T_9P+1)T_9P+k_9}, W_{10}(P) = \frac{k_{10}}{T_{10}P+1}, \\
 W_{11}(P) &= \frac{k_{11}(T_{11}P+1)}{(T_{11}P+1)T_{11}P+k_{11}}, W_{СКН}(P) = \frac{k_{СКН}P}{T_{СКН}^2P^2+1}, W_{СТ}(P) = \frac{k_{СТ}}{T_{СТ}P+1}, W_{СТС}(P) = \frac{k_{СТС}}{T_{СТС}P+1}, \\
 W_{СМУ}(P) &= \frac{k_{СМУ}}{T_{СМУ}^2P^2+1}, W_{ДКН}(P) = \frac{k_{ДКН}P}{T_{ДКН}^2P^2+1}, W_{ДТ}(P) = \frac{k_{ДТ}}{T_{ДТ}P+1}, W_{ДТС}(P) = \frac{k_{ДТС}}{T_{ДТС}P+1}, \\
 W_{ДМ}(P) &= \frac{k_{ДМ}}{T_{ДМ}^2P^2+1}, W_{ВЭ}(P) = \frac{k_{ВЭ}}{T_{ВЭ}^2P^2+1}, W_{ИЭ}(P) = \frac{k_{ИЭ}}{1+T_{ИЭ1}P+T_{ИЭ2}P^2}, W_{ДКВКТ}(P) = \frac{k_{ДКВКТ}}{T_{ДКВКТ}P+1}, \\
 W_{ЗВКТ}(P) &= \frac{k_{ЗВКТ}}{T_{ДТС}P+1}, W_{ЭС1}(P) = k_{ЭС1} \frac{T_{ЭС1}P+1}{T_7P+1}, W_{ЭС2}(P) = k_{ЭС2} \frac{T_{ЭС2}P+1}{T_{ВКТ}P+1},
 \end{aligned} \tag{9}$$

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.

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-Ромберга и структурное моделирование в Matlab.

Структурное моделирование переходных процессов проводилось на основе уравнений движения и переходных функций элементов структуры (рис.5) в Matlab, наиболее распространенном и удобном языке для технических вычислений, который реализован методом Дорманда-Принса.

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

Применение регуляторов P, PI, PID для установленной структурной схемы определяет запас устойчивости по амплитуде, по фазе и времени регулирования, перерегулирования от скорости формирования управляющих воздействий и оценит

качество регулирования. На рис.14 (а-б) представлены результаты моделирования на программе Matlab-Simulink.

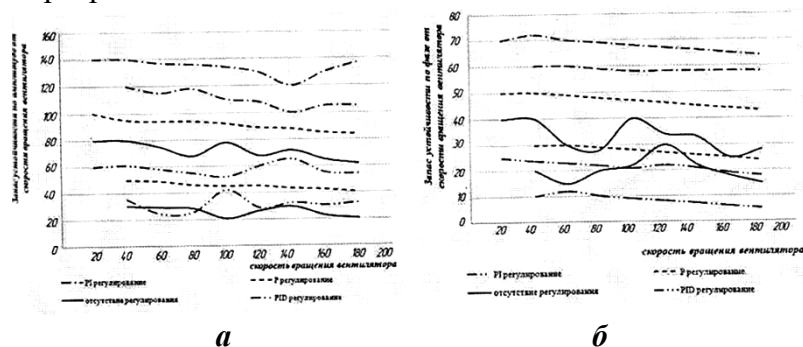


Рис.14. Результаты применения регуляторов P, PI, PID: а - запас устойчивости по амплитуде; б - запас устойчивости по формированию управляющих воздействий

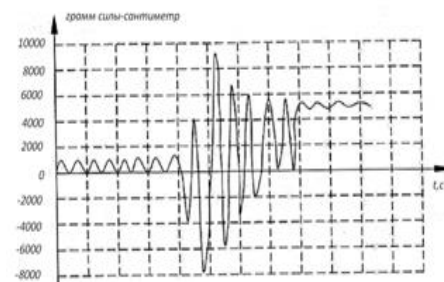


Рис.15. Зависимость момента РВЭД от времени

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.15 представлена зависимость момента РВЭД от времени, из которой видно, что затраты энергии в реактивно-вентильных электродвигателях снизились на 25-30%.

В четвертой главе проведено планирование эксперимента и разработана методика экспериментального соответствия их проведению в производственных условиях. Проводимые испытания основаны на теории подобия физических процессов и составления критериев подобия, обеспечивающих получение требуемого уровня эффективности функционирования при интервале между точками отсчета, который выбирается из условия $\hat{P}_n = 0,92$, достаточности объема $n=103$.

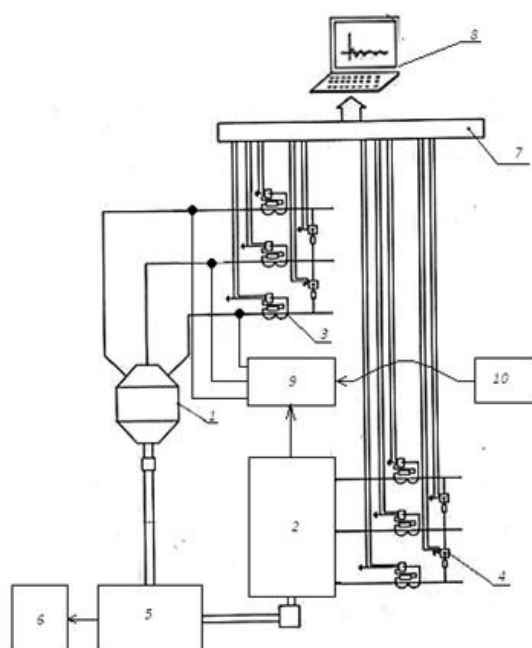


Рис. 16. Стенд и аппаратура экспериментальных исследований

Определены критерии подобия путем приведения уравнений математической модели конструктивной схемы (рис.5) на основе функциональных связей её элементов и устройств к безразмерному виду способом интегральных аналогов.

На рис.16 представлен разработанный стенд и аппаратура экспериментальных исследований, которые содержат, датчик положения регулировочного 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.

На рис. 16: 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 - задатчик давления.

Для экспериментальных исследований переходных процессов в газопроводе с изоляцией, включающей «рабицу», связанных с оценкой эффективности применения электрохимической защиты в рамках конструктивной схемы (рис.5) с учётом критериев подобия использовался современный высокотехнологичный комплекс КМД-01М.

Аппаратура, разработанная на базе ПЭВМ, включает аналогово-цифровой преобразователь и комплект датчиков, обеспечивающих измерения мгновенных значения тока, напряжения и частоты вращения двигателя.

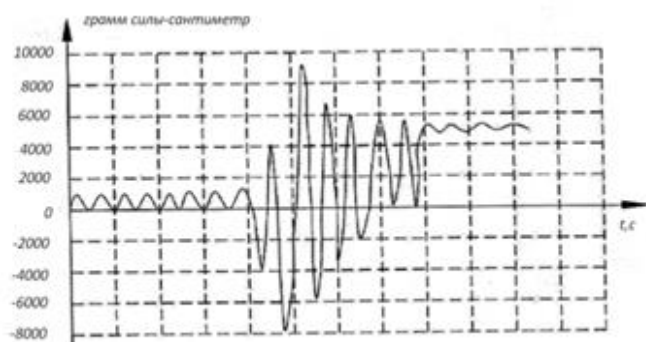


Рис.17. Зависимость момента РВЭД от времени

Производилась запись тока статора, изменение величины которого пропорционально изменению величины момента (рис.17). Сравнение результатов замеров и расчетов моделей показывает, что относительная погрешность не превышает 15% и мощность электродвигателя снизилась до 25%, т.е. имеет место снижение энергозатрат.

Физическая модель электрохимической защиты газопроводов основана на том, что сдвигая потенциал металла пропусканием внешнего катодного тока, изменяем скорость его коррозии.

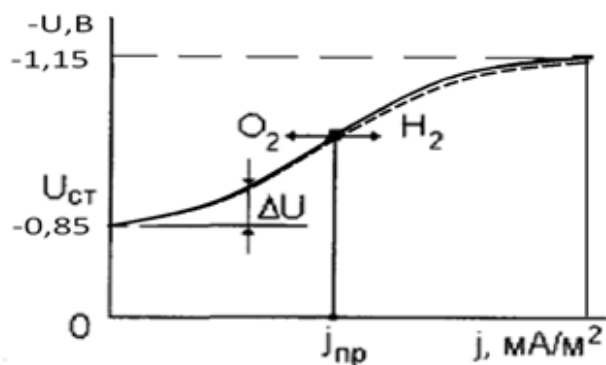


Рис.18. Экспериментальная катодная поляризационная характеристика:

— стального газопровода,
----- газопровода с изоляцией и «рабицей»

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,

обладают искро-взрыво-безопасным исполнением электрохимической защиты газопроводов. Причём дублёр стального газопровода — «рабица» — полностью обеспечивает его электрохимическую защиту (рис.18).

Анализ инерционности системы контроля расхода и давления газа в газораспределительных сетях бесконтактным измерением температуры ИК, 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 расчёт (рис.17, рис.18) 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.

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, искро- взрывобезопасного 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.

Публикации по теме диссертации:

1. 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.

2. Дмитриев В.В. Анализ конструктивных схем электротехнических устройств и способов бесконтактного контроля технического состояния стальных газопроводов, их

изоляции, электрохимической защиты и объёма газа // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. Вып.12 Ч.3. - С.71-78.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.