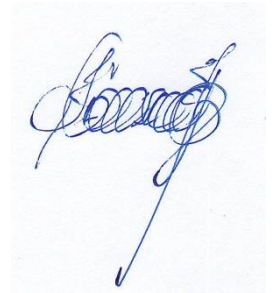


На правах рукописи



Пахомов Сергей Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ
СОБСТВЕННЫХ НУЖД ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула – 2018

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

Научный
руководитель: Степанов Владимир Михайлович,
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты: Калинин Вячеслав Федорович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический
университет»,
профессор кафедры «Электроэнергетика»

Дмитриев Вячеслав Валентинович,
кандидат технических наук,
АО «Газпром газораспределение Калуга» г. Калуга,
генеральный директор

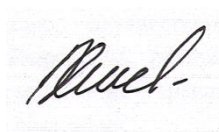
Ведущее
предприятие: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Нижегородский
государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Защита диссертации состоится 26 декабря 2018г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.12, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного 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 25 октября 2018г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Хмелёв
Роман Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

По мере развития промышленного производства возрастает удельная потребность в энергии различного вида, а также бытовом её использовании. Особенно возрастает роль электрической энергии, что обусловлено рядом её преимуществ – налаженная генерация, удобство доставки к конечному потребителю, универсальность, удобство и простота преобразования в другие виды энергии.

Одним из ведущих производителей электрической энергии являются тепловые электростанции, которые используют органическое топливо – твёрдое (уголь), жидкое (продукты переработки нефти) и газообразное (природный газ). Причём происходит непрерывный рост использования природного газа, что обеспечивает эффективность процессов горения, повышает экономичность тепловых электростанций и уменьшает их вредное влияние на окружающую среду.

Россия является мировым лидером по добыче газа, где публичное акционерное общество «Газпром» эксплуатирует самую протяжённую газотранспортную сеть в мире – 170 тысяч километров магистральных газопроводов, включая газораспределительные сети, где их протяжённость увеличивается с каждым годом.

Устойчивая тенденция снижения надёжности электроснабжения от внешних сетей является одним из основных факторов при принятии решений в ПАО «Газпром» о развитии собственной энергетической базы на основе применения собственных источников электрической энергии – автономных источников электроэнергии, где внедряются не только традиционные энергоустановки, но и энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии (фотогальваника, ветроустановки и др.).

Поэтому, повышение эффективности и надёжности электромеханических и электротехнических систем автономных источников электроэнергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей является актуальной научной задачей.

Цель выполнения диссертационной работы: повышение эффективности функционирования электромеханических и электротехнических систем автономных источников электроэнергии с реактивно-вентильными электродвигателями и генераторами путём резервирования электрической энергии солнечной панелью, магнитным преобразователем и универсальным устройством её накопления и дозированного питания для обеспечения требуемого уровня надёжности возбуждения генератора и подогрева газа для собственных нужд объектов газораспределительных сетей, и, формирования энергосберегающего режима их работы за счёт контроля и управления расходами газа и электрической энергии, и, обоснования их структуры и параметров, комплексно учитывающих электромагнитные и электромеханические процессы и функциональные связи конструктивных схем.

Объект исследования: электромеханическая система поворота солнечной панели с реактивно-вентильным безредукторным электродвигателем или магнитным преобразователем в электротехнической системе резервирования электрической энергии с универсальным устройством её накопления и дозированного питания, электромеханическая система с реактивно-вентильным генератором электрической энергии, электротехнические устройства питания систем возбуждения генератора и нагрева газа, электротехнические системы контроля и формирования управляющих воздействий за распределением электрической энергии и расходом газа и

энергосберегающим режимом работы автономных источников электропитания для собственных нужд объектов газораспределительных сетей.

Предметом исследования являются переходные процессы в электромеханических и электротехнических системах резервирования электрической энергии за счёт солнечной панели с электромеханическим устройством её поворота, включающим безредукторный реактивно-вентильный электродвигатель или электромагнитный преобразователь, универсальный накопитель и преобразователь электрической энергии для дозированного питания обмоток возбуждения реактивно-вентильных генератора и электродвигателя, подогрева газа, контроля и формирования управляющих воздействий распределением электрической энергии, расходом газа и энергосберегающим режимом работы автономных источников электропитания для собственных нужд объектов газораспределительных сетей, в электромеханической системе микротурбина - реактивно-вентильный генератор и электротехнической системе, обеспечивающей полное использование генерируемой электрической энергии и имеющую структуру генератора, позволяющую при снижении затрат на его конструктивное исполнение получить увеличение генерируемой электрической энергии.

Методы исследования, используемые в диссертационной работе, основаны на теории электрических цепей, математического моделирования, расчётов параметров переходных процессов, теории автоматического управления, надёжности технических систем, теории подобия, имитационного моделирования и вычислительного эксперимента и экспериментальных исследований на физических моделях и в производственных условиях.

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

1) Анализ конструктивных схем, режимов работы, методов расчёта параметров, моделирования и надёжности электромеханических и электротехнических систем резервирования с накопителями, преобразователями и дозированного питания электрической энергии и её генерации на базе реактивно-вентильных электродвигателей и генераторов автономных источников электроэнергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей.

2) Определение функциональных связей электромеханических и электротехнических систем резервирования с накопителями, преобразователями и дозированного питания электрической энергии обмоток возбуждения реактивно-вентильных генератора и электродвигателя устройств поворота солнечной панели и нагрева газа, и, распределения электрической энергии на элементы контроля и управление энергосберегающим режимом генерирования, распределения электрической энергии автономных источников электропитания и расходом газа на объектах газораспределительных сетей.

3) Разработка математической модели электромеханических и электротехнических систем резервирования с накопителями, преобразователями и дозированного питания электрической энергии обмоток возбуждения реактивно-вентильных генератора и электродвигателя устройств поворота солнечной панели и нагрева газа, и, распределения электрической энергии на элементы контроля и управление энергосберегающим режимом генерирования, распределения электрической энергии автономных источников электропитания и расходом газа на объектах

газораспределительных сетей в комплексе учитывающих характеристики электромеханических и электромагнитных процессов.

4) Исследование математических моделей электромеханических и электротехнических систем автономных источников электроэнергии на объектах газораспределительных сетей и определение зависимостей для обоснования их рациональных параметров и структуры.

5) Определение закономерностей формирования переходных процессов в электромеханических и электротехнических системах автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей и управляющих воздействий для обеспечения энергосберегающего режима генерации и распределения в нём электрической энергии.

6) Определение рациональных параметров электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей, структуры и топологии управления энергосберегающими режимами в нём генерации и распределения электроэнергии, обеспечивающих требуемый уровень эффективности и надёжности их функционирования.

7) Численные и экспериментальные исследования режимов работы электромеханических и электротехнических систем автономных источников электроэнергии на объектах газораспределительных сетей при применении разработанных новых технических решений по контролю и управлению в них переходными процессами при эксплуатации.

На защиту выносятся:

1) Методика определения функциональных связей электромеханических и электротехнических систем резервирования с накопителями, преобразователями и дозированного питания электрической энергии обмоток возбуждения реактивно-вентильных генератора и электродвигателя устройств поворота солнечной панели или электромагнитного преобразователя и нагрева газа, и, распределения электрической энергии на элементы контроля и управление энергосберегающим режимом генерирования, распределения электрической энергии автономных источников электропитания и расходом газа на объектах газораспределительных сетей.

2) Математические модели электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей и зависимости, определяющие их рациональные параметры и структуру, учитывающие в комплексе характеристики электромеханических и электромагнитных процессов.

3) Закономерности формирования переходных процессов в электромеханических и электротехнических системах автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей и управляющих воздействий, обеспечивающих энергосберегающий режим генерации и распределения в нём электрической энергии.

4) Условия реализуемости математических моделей электромеханических и электротехнических систем резервирования с накопителями, преобразователями и дозированного питания электрической энергии обмоток возбуждения реактивно-вентильных генератора и электродвигателя устройств поворота солнечной панели или электромагнитного преобразователя и нагрева газа, и, распределения электрической энергии на элементы контроля и управление энергосберегающим режимом генерирования, распределения электрической энергии автономных источников

электропитания и расходом газа на объектах газораспределительных сетей, обеспечивающие требуемый уровень эффективности и надёжности их функционирования.

Научная новизна заключается в определении рациональных структуры и параметров электромеханических и электротехнических систем резервирования с накопителями, преобразователями и дозированного питания электрической энергии обмоток возбуждения реактивно-вентильных генератора и электродвигателя устройств поворота солнечной панели или электромагнитного преобразователя и нагрева газа, и, распределения электрической энергии на элементы контроля и управление энергосберегающим режимом генерирования, распределения электрической энергии автономных источников электропитания и расходом газа на объектах газораспределительных сетей.

Она представлена следующими результатами:

1) Разработана методика определения структуры и функциональных связей электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей.

2) Получены зависимости для расчёта рациональных параметров электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей, учитывающие в комплексе характеристики электромеханических и электромагнитных процессов.

3) Установлены закономерности формирования переходных процессов и управляющих воздействий в автономном источнике электроэнергии на объектах газораспределительных сетей, обеспечивающих энергосберегающий режим генерации и распределения в нём электрической энергии.

4) Определены условия реализуемости рациональных режимных и конструкционных параметров электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей, обеспечивающих требуемый уровень эффективности и надёжности их функционирования.

Практическая значимость результатов работы. Разработаны новые технические решения и методика расчёта рациональных параметров электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей, определена структура и топология управления энергосберегающими режимами его работы, учитывающих в комплексе формирование в нём управляющих воздействий генерацией и распределением электрической энергии в зависимости от требуемого уровня эффективности функционирования автономного источника электропитания. Экономический эффект от электромеханических и электротехнических систем автономных источников электроэнергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей, обеспечивающих требуемый уровень эффективности их функционирования в комплексе составляет 1 212 300 рублей.

Реализация результатов работы.

Основные научно-практические результаты диссертационной работы использованы в «Программе – Перспективный план технического развития газораспределительных систем АО «Газпром газораспределение Тула» 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.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2018» в рамках XVI Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2018 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 32 печатных работах, из них 4 статей – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, имеется 18 патентов РФ на полезную модель и 10 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 136 наименований, содержит 62 рисунков и 10 таблиц. Общий объём – 158 страницы.

Диссертация выполнена по тематике НИОКР Тульского государственного университета № 1121801 АО «Газпром газораспределение Тула» - «Повышение эффективности функционирования электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей».

Личный вклад автора. Разработаны методика определения структуры функциональных связей, математические модели электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей, получены зависимости, определяющие их рациональные параметры, учитывающие в комплексе характеристики электромеханических и электромагнитных процессов, установлены закономерности формирования в них переходных процессов, управляющих воздействий и условия реализуемости их математических моделей, обеспечивающих требуемый уровень эффективности и надёжности функционирования систем. Проведены численные и экспериментальные исследования подтвердившие работоспособность систем автономного источника электропитания и правильность теоретических исследований.

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 электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей, физических процессов в системах и сетях, методов моделирования в них переходных процессов и расчёта режимных параметров как систем, так и сетей, условий их эксплуатации.

Необходимо разработать новые технические решения электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей, 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 электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах 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.

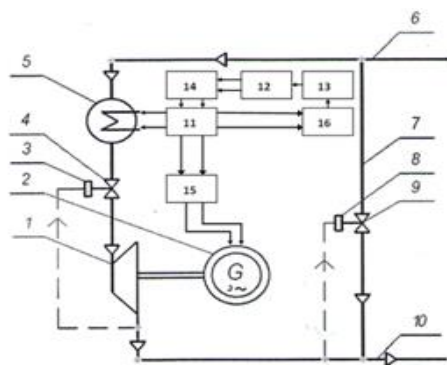


Рис. 1. Структурно-функциональная схема микротурбогенераторной установки

На основании анализа использования нейронной сети с применением разработанного математического аппарата проведено моделирование режимов работы электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей, и, системы их диагностики в комплексе с использованием приложения MatLabSimPowerSystems, а также выбрана наиболее рациональная структурно-функциональная схема микротурбогенераторной установки (рис. 1).

На рис. 1: 1 - турбина; 2 - электрогенератор; 3 - регулятор давления; 4 - регулирующий клапан; 5 - подогреватель газа; 6 - газопровод высокого давления; 7 - байпасный трубопровод; 8 - регулятор давления; 9 - байпасный клапан; 10 - газопровод

низкого давления; 11 – электрический преобразователь; 12 – солнечная панель; 13 – безредукторный реактивно-вентильный электродвигатель устройства поворота солнечной панели; 14 - накопитель электрической энергии; 15 – обмотка возбуждения реактивно-вентильного генератора электрической энергии; 16 - обмотка возбуждения реактивно-вентильного электродвигателя.

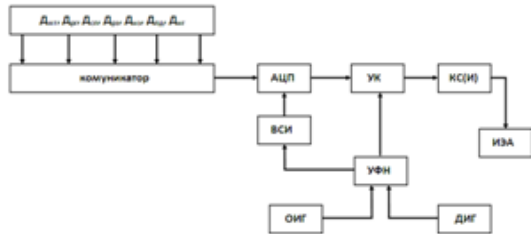


Рис. 2. Структура измерительно-управляющего модуля

Кроме того, получена структура измерительно-информационно-управляющего модуля – ИИУМ на основе структурно-функциональной схемы микротурбогенераторной установки (рис.2), который включает датчики измеряемых параметров системы диагностики $D_1 \dots D_N$, коммутатор К, через который датчики подключены к аналогово-цифровому

преобразователю АЦП, источники питания электрической энергией ОИГ – основной источник генерации и ДИГ – дополнительный источник генерации, узел формирования напряжения, который вырабатывает ряд напряжений, необходимых для работы ИИУМ и может модулировать синхроимпульсы ВСИ для запуска АЦП и синхронизации работы элементов автономного источника электропитания для собственных нужд объектов газораспределительных сетей, где внутренний генератор ИИУМ формирует токовые импульсы, которые задают скорость выдачи последовательного кода с выхода АЦП устройства кодирования УК, преобразующего двойной последовательный код с выхода АЦП в сигнал, в котором «0» и «1» представлены импульсами разной длительности, КС – канал связи (интерфейс), через который сформированные управляющие воздействия передаются ИЭА – исполнительным элементом автономного источника электроэнергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей системами управления режимами работы его электромеханическими и электротехническими устройствами и переходными процессами систем и газораспределительных сетей, где рациональная структура функциональных связей конструктивной схемы обеспечивает требуемые уровни эффективности и надёжности их функционирования.

Рациональная структура функциональных связей конструктивной схемы (рис.1) обеспечивает в комплексе требуемый уровень эффективности функционирования систем диагностики, электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей, 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:

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

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

Исходя из структуры взаимосвязанных элементов электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей 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)

Таблица 1

Показатель надежности	q_{HM}	P_{HM}	$\lambda_{HM}, 1/ч$	$t_{HM}, ч$	$T_{OHM}, ч$	$t_{дп}, ч$
электромеханические элементы	0,0062	0,9948	0,0034	17,29	500,62	1,4
электротехнические элементы	0,0071	0,9972	0,0026	18,41	624	1,77

Показатель надежности	$k_{ТИМ}$	$P_y(t)$	k_{Π}	K_H	k_m	K_0	$t_{МП}$	$k_{ММ}$
электромеханические элементы	0,972	0,04	1,44	1,49	0,995	0,66	280,4	13
электротехнические элементы	0,94	0,008	1,85	1,97	0,995	0,67	255,2	15

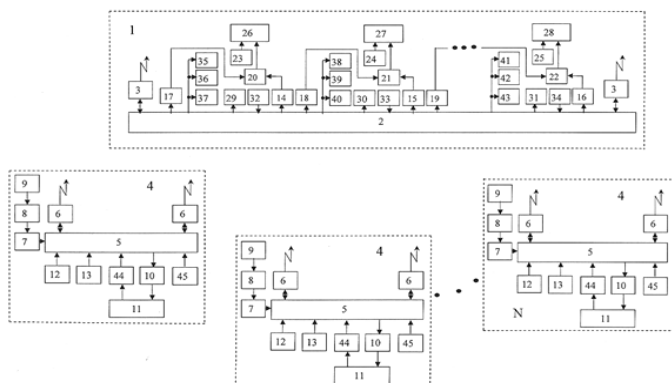


Рис. 3

В третьей главе разработаны новые технические решения, реализующие топологию электромеханических и электротехнических систем автономного источника электроэнергии на объектах газораспределительных сетей на основе обобщенной рациональной структуры функциональных связей конструкционной схемы рис.1.

На рисунке 3 представлена схема автоматизированной системы мониторинга и управления запорно-регулирующей арматурой газораспределительной сети.

Автоматизированная система мониторинга и управления запорно-регулирующей арматурой газораспределительной сети содержит диспетчерский пункт 1 с контроллером 2 и приемопередающими узлами 3 диспетчерского пункта и модули мониторинга и управления запорно-регулирующей арматурой 4 с контроллерами 5 взаимосвязанными с приемопередающими узлами 6 модулей для обмена информацией с диспетчерским пунктом, аккумуляторные батареи 7 с адаптерами 8 и солнечными батареями 9, приводы 10 для управления запорно-регулирующей арматурой 11, датчики давления на входе 12 и выходе 13 запорно-регулирующей арматуры соединенные с контроллерами, блоки регистрации давления на входах первой 14, второй 15 и N 16 запорно-регулирующей арматуры, блоки регистрации давления на выходах первой 17, второй 18 и N 19 запорно-регулирующей арматуры, первые блоки сравнения давлений на первом 20, втором 21 и N 22 участках газопроводов между запорно-регулирующей арматурой, задатчики допустимых перепадов давлений на первом 23, втором 24 и N 25 участках газопроводов, вторые блоки сравнения давлений на первом 26, втором 27 и N 28 участках газопроводов между запорно-регулирующей арматурой, блоки регистрации положения заслонки первой 29, второй 30 и N 31 запорно-регулирующей арматуры, блоки управления положением заслонки первой 32, второй 33 и N 34 запорно-регулирующей арматуры, блоки регистрации уровня сигнала связи 35, уровня заряда аккумулятора 36 и состояния охранной сигнализации 37 первой запорно-регулирующей арматуры, блоки регистрации уровня сигнала связи 38, уровня заряда аккумулятора 39 и состояния охранной сигнализации 40 второй запорно-регулирующей арматуры, блоки регистрации уровня сигнала связи 41, уровня заряда аккумулятора 42 и состояния охранной сигнализации 43 N - запорно-регулирующей арматуры, датчики положения заслонки 44 и охранной сигнализации 45 запорно-регулирующей арматуры.

Разработаны новые технические решения по реактивно-вентильному генератору:

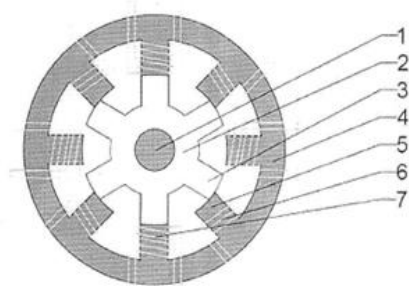


Рис. 4

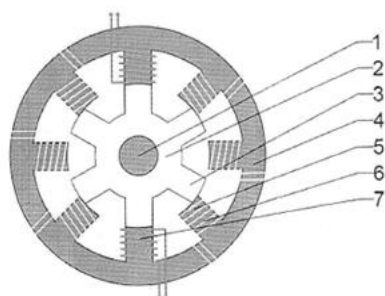


Рис. 5

Первый состоит из безобмоточного ротора, статора, имеющего полюса с обмотками, где дополнительно на полюсах статора намотаны обмотки контроля, расположенные с определенным шагом, обеспечивающие определение положения ротора вследствие изменения магнитного поля

На рис. 4 изображен общий вид вентильно-реактивного генератора. На валу 1 размещен безобмоточный ротор 2 с полюсами 3, так же имеется статор 4 с полюсами 5, поочередно охваченными фазными обмотками 6 и обмотками контроля 7, расположенными с определенным шагом.

Второй состоит из безобмоточного ротора, статора, имеющего полюса с обмотками, где дополнительно на полюсах статора намотаны обмотки контроля без фазной обмотки, расположенные с определенным шагом, обеспечивающие определение положения ротора вследствие изменения магнитного поля.

На рис. 5 изображен общий вид вентильно-реактивного генератора. На валу 1 размещен безобмоточный ротор 2 с полюсами 3, также имеется статор 4 с полюсами 5, охваченными фазными обмотками 6 и обмотками контроля 7, расположенными с определенным шагом.



Рис. 6

положения ротора необходимо в полюсах, имеющих разные магнитные проводимости, магнитной системы реактивно-вентильного двигателя сформировать измерительные МДС, связанные между собой квадратурными соотношениями, частотой порядка 10 кГц. Так как магнитная проводимость под полюсами реактивно-вентильного двигателя различна и зависит от углового положения ротора, то связанные между собой квадратурно магнитные потоки будут суммироваться в магнитной системе реактивно-вентильного двигателя с разными амплитудами и приводить к возникновению суммарного магнитного потока, фаза которого зависит от углового положения ротора реактивно-вентильного двигателя.

Предложенное техническое решение позволило упростить конструкцию вентильно-реактивного генератора и двигателя при одних и тех же массо-габаритных размерах увеличило генерацию электрической энергии в 1,25 – 1,5 раза.

Достоинством данных новых технических решений также является то, что их конструктивное исполнение позволяет им работать как в генераторном режиме, так и в режиме реактивно-вентильного электродвигателя, т.е. доказывает универсальность конструктивного исполнения.

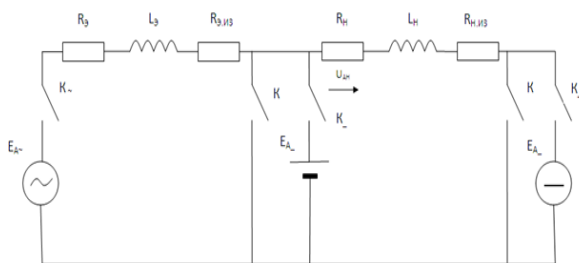


Рис. 7

В данном случае, амплитуда синусоидальной компоненты тока при замкнутом $K_{\sim}$ и к моменту замыкания K (рис. 7)

$$J_m(0) = \frac{U_m}{\sqrt{(R_k + R_n)^2 + \omega(L'_k + L'_n)^2}}, \quad (4)$$

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.

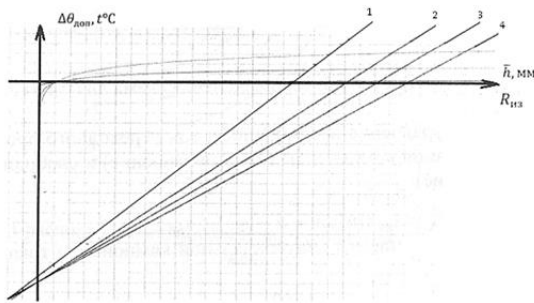


Рис.8

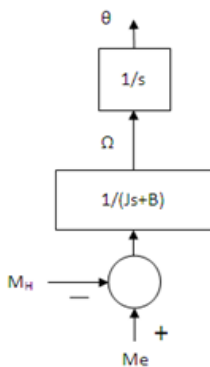


Рис.9

На основании (5) определён закон распределения и график распределения, где точка пересечения функций этих зависимостей показывают уровень совместимости электромеханических и электротехнических систем автономного источника электрической энергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей и их режимных параметров (рис. 8), который

подтверждает требуемый уровень контроля и управления, надёжности электроснабжения и энергоэффективности их функционирования.

Математическая модель электромеханической системы поворота солнечной панели с реактивно-вентильным электродвигателем 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. Механические динамика двигателя и нагрузки регулируются уравнениями движения и структура показана на рис.9.

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

$$M - (M_{21} - M_{13}) = J_1 p \omega_1 \quad M_{21} - M_{c2} = J_2 p \omega_2 \quad -M_{13} - M_{c3} = J_3 p \omega_3 \quad p M_{21} = C_{21}(\omega_1 - \omega_2) \quad (7)$$

$$p M_{13} = C_{13}(\omega_3 - \omega_1) \quad U_j = R_j i_j + \frac{d\Psi_j(0, i_j)}{dt} \quad M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{нр}$$

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

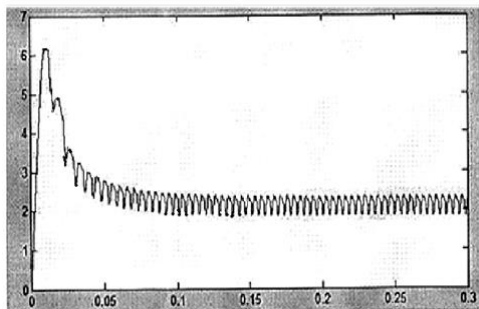


Рис.10

На рис.10 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 основании структурно-функциональных схем (рис.1) установлены передаточные функции элементов, входящих в их состав, где они пронумерованы в соответствии с их номерами:

$$\begin{aligned} W_1(p) &= k_1 \frac{\tau_1 p + 1}{T_1 p + 1}, \text{ где } \tau_1 > T_1; W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}; W_3(p) = \frac{k_3}{1 + T_3^2 p^2}; W_4(p) = k_4 p; \\ W_5(p) &= \frac{k_5}{1 + T_5 p + T_5^2 p^2}; W_6(p) = k_6; W_7(p) = \frac{k_7}{1 + T_7 p^2}; W_8(p) = k_8 p; \\ W_9(p) &= k_9 p; W_{10}(p) = k_{10}; W_{11}(p) = \frac{\tau_{11} p + 1}{T_{11} p + 1}, \text{ где } T_{11} > \tau_{11}; \\ W_{12}(p) &= \frac{k_{12}}{1 + T_{12} p + T_{12}^2 p^2}; W_{13}(p) = \frac{k_{13}}{T_{13} p + 1}; \\ W_{14}(p) &= \frac{k_{14}}{1 - T_{14}^2 p^2}; W_{15}(p) = \frac{k_{15}}{T_{15} p + 1}; W_{16}(p) = \frac{k_{16}}{T_{16} p + 1}. \end{aligned} \quad (8)$$

На основе передаточных функций элементов структурно-функциональных схем электромеханических и электротехнических систем автономного источника электрической энергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей 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 структурного моделирования в Matlab.

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

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

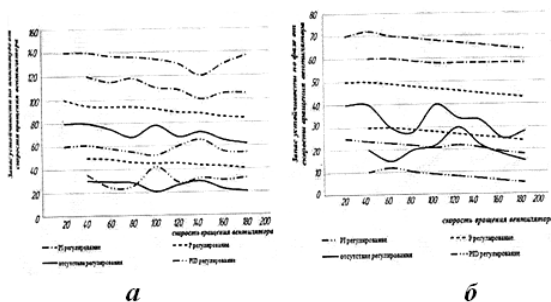


Рис.11. Результаты применения регуляторов P, PI, PID: а - запас устойчивости по амплитуде; б - запас устойчивости по формированию управляющих воздействий

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.11 (а-б) представлены результаты моделирования на программе Matlab-Simulink.

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 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 выбран из условия $\hat{P}_n = 0,92$, достаточности объема $n=103$.

Определены критерии подобия путем приведения уравнений математической модели конструктивной схемы (рис.1) на основе функциональных связей её элементов и устройств к безразмерному виду способом интегральных аналогов.

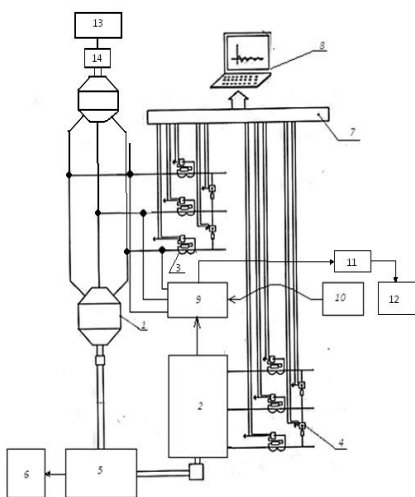


Рис. 12

На рис.12 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 регулировочного винта комбинированного регулятора давления газа.

На рис. 12: 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; 11-микротурбина; 12- реактивно-вентильный генератор; 13- солнечная панель; 14- устройство поворота солнечной панели.

Проводимые работы и испытания основаны на минимуме расходуемых ресурсов числа испытаний, обеспечивающих получение требуемых показаний надёжности путём исследования функциональной избыточности. В качестве показателя функциональной избыточности в параметрической модели электромеханической системы генерации электрической энергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей, принят коэффициент запаса (надёжности). Планирование эксперимента и предлагаемая методика соответствуют проведению в лабораторных условиях. Разработанный стенд с аппаратурой экспериментальных исследований для электромеханической системы рекуперации электрической энергии с реактивно-вентильным электродвигателем представлены на рис. 13.

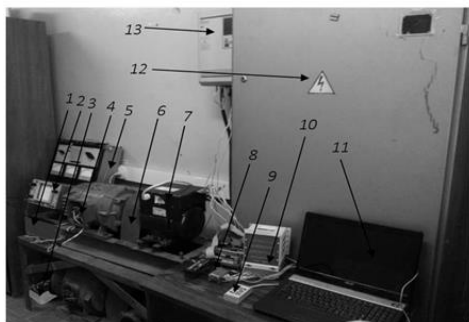


Рис. 13

На рис. 13: 1- источник квадратурных токов для формирования измерительной ЭДС, состоящий из двух линейных источников тока, выполненных на транзисторах и операционном усилителе, и генератора квадратурных сигналов; 2-осциллограф; 3-суперконденсатор системы рекуперации электрической энергии; 4-генератор, для моделирования генераторного режима реактивно-вентильного электродвигателя; 5- датчики тока и напряжения; 6-муфта с механическим тормозным устройством; 7- реактивно-вентильный электродвигатель, с блоком коммутации; 8-блок драйверов для

управления микропроцессорной системой управления; 9-пульт управления генератором; 10-микропроцессорная система управления; 11-ЭВМ для формирования управляющих воздействий и сбора данных; 12-ВРУ с блоками питания и защитной автоматикой; 13-частотный преобразователь для регулирования скорости вращения генератора.

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

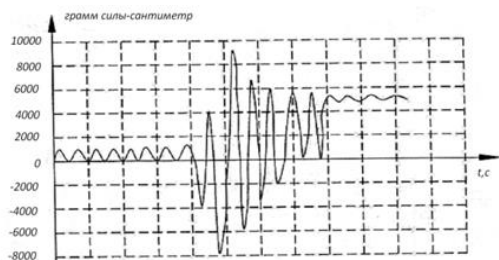


Рис.14

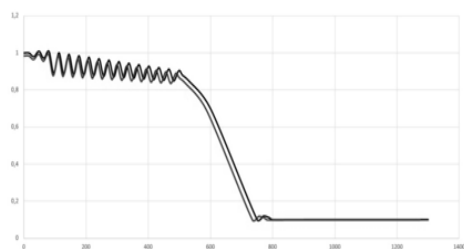


Рис.15

Производилась запись тока статора, изменение величины которого пропорционально изменению величины момента (рис.14). 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.

Результаты экспериментальных исследований, обработанных ЭВМ показаны на рис. 15.

Сравнение результатов замеров при экспериментальных исследованиях и расчёт показывает, что относительная погрешность не превышает 15%.

Разработана физическая модель конструктивной схемы, учитывающая функциональные связи электромеханических и электротехнических систем автономного источника электрической энергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей 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 20-25%, 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 электромеханических и электротехнических систем автономного источника электрической энергии, комплексной следящей системы контроля и управления их режимами работы, и, закономерности формирования управляющих воздействий на основе структуры функциональных связей её элементов и функциональных модулей, обеспечивающих требуемый уровень надёжности электроснабжения, энергоэффективности их режимов работы и распределения в нём электрической энергии.

1. Применение электромеханических и электротехнических систем автономного источника электрической энергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей обеспечивается путём комплексной следящей системы контроля и управления их режимами работы и переходными процессами в них.

2. Конструктивные схемы и параметры электромеханических и электротехнических систем автономного источника электрической энергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей учитывают физические процессы и их изменения и обеспечивать требуемый уровень чувствительности и разрешающей способности.

3. Определены функциональные связи электромеханических и электротехнических систем автономного источника электрической энергии, учитывающих в комплексе закономерности формирования их режимных параметров и управляющих воздействий.

4. Разработаны математические модели формирования топологии и управляющих воздействий в электромеханических и электротехнических системах комплексной следящей системы контроля и управления их режимами работы.

5. Установлены условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности, и, обоснованы рациональные параметры электромеханических и электротехнических систем автономного источника электрической энергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей с учётом массо-габаритных их характеристик.

6. Численные и экспериментальные исследования режимов работы электромеханических и электротехнических систем автономного источника электрической энергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей, выполненные на основе разработанных их имитационных и физических моделей подтвердили, что расхождение между ними составило 14,5%, а эффективность функционирования достигла 20-25%.

Публикации по теме диссертации:

1. Степанов В.М., Горелов Ю.И., Авдошин В.С., Пахомов С.Н. Пат. №168624 на полезную модель. Вентильно-реактивный генератор: Рос. Федерация. Оpubл. 13.02.2017. Бюл.№5.

2. Степанов В.М., Горелов Ю.И., Авдошин В.С., Пахомов С.Н. Пат. №172453 на полезную модель. Вентильно-реактивный генератор: Рос. Федерация. Оpubл. 11.07.2017. Бюл.№20.

3. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Пат. №159533 на полезную модель. Детандер-генераторное устройство: Рос. Федерация. Оpubл. 10.02.2016. Бюл.№4.

4. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Пат. №168649 на полезную модель. Детандер-генераторное устройство с температурной коррекцией электрогенератора: Рос. Федерация. Оpubл. 13.02.2017. Бюл.№5.

5. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Пат. №2626268 на полезную модель. Устройство турбодетандера с регулированием давления в газовой магистрали: Рос. Федерация. Оpubл. 25.07.2017. Бюл.№21.

6. Воробьев Н.Ю., Густов С.В., Попов Н.К., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Пат. №116199 на полезную модель. Устройство дистанционного

мониторинга шкафных газораспределительных пунктов: Рос. Федерация. Оpubл. 20.05.2012. Бюл.№14.

7. Воробьев Н.Ю., Густов С.В., Попов Н.К., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Пат. №109598 на полезную модель. Устройство дистанционного контроля утечек газа и загазованности помещений: Рос. Федерация. Оpubл. 20.10.2011. Бюл.№29.

8. Воробьев Н.Ю., Густов С.В., Попов Н.К., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Пат. №109211 на полезную модель. Автоматизированная система мониторинга и управления запорно-регулирующей арматурой газораспределительной сети: Рос. Федерация. Оpubл. 10.10.2011. Бюл.№28.

9. Воробьев Н.Ю., Густов С.В., Попов Н.К., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Программа автоматизированной системы дистанционного управления объектами газораспределения: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2051615715 по заявке №2011614052 от 01 июня 2011 г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 июля 2011г.

10. Воробьев Н.Ю., Густов С.В., Попов Н.К., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Программа телеметрического блока контроля параметров работы объектов электрохимической защиты: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011618126 по заявке №2011613815 от 24 мая 2011г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 октября 2011 г.

11. Воробьев Н.Ю., Густов С.В., Попов Н.К., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Система автоматической коррекции работы станций катодной защиты: Патент на изобретение № 2465570, приоритет от 24 мая 2011 г, Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 октября 2012 г.

12. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Программа мониторинга и управления территориальнораспределенными станциями катодной защиты для обеспечения энергосберегающих режимов работы: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2015612765 по заявке №2014663757 от 29 декабря 2014г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 февраля 2015 г

13. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Программа дистанционного мониторинга территориально распределенных газораспределительных пунктов: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2015615521 по заявке №2015612406 от 31 марта 2015г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 мая 2015 г.

14. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Программа оптимизации работы газорегулирующего оборудования с реактивно-вентильным электродвигателем в линии редуцирования природного газа: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2015619872 по заявке №2015616490 от 16 июля 2015г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15 сентября 2015 г.

15. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Устройство измерения скорости коррозии подземных газопроводов: Патент на полезную модель № 160685, приоритет от 19 октября 2015 г.. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 03 марта 2016 г.

16. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Устройство регулирования турбодетандера: Патент на изобретение № 2579301, приоритет от 29

декабря 2014 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 03 марта 2016 г.

17. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Программа дистанционного мониторинга работы газорегулирующего оборудования с детандер-генератором в линии редуцирования и оповещением при возникновении аварийных ситуаций: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2016613960 по заявке №2016611601 от 29 февраля 2016г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 апреля 2016 г.

18. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Программа мониторинга и оптимизации газорегулирующего оборудования давления и расхода природного газа: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2016614384 по заявке №2016611593 от 29 февраля 2016г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 апреля 2016 г.

19. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Программа мониторинга территориально-распределенных станций катодной защиты и обеспечения энергосберегающих режимов работы на основе сетевых технологий: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2016614381 по заявке №2016611589 от 29 февраля 2016г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 апреля 2016г.

20. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Устройство мониторинга скорости коррозии подземных трубопроводов: Патент на полезную модель № 167042лфиоритет от 13 июля 2016 г.. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 02 декабря 2016 г,

21. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Устройство адаптивного регулирования турбодетандера: Патент на изобретение № 2611120, приоритет от 19 октября 2015 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 21 февраля 2017 г.

22. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Автоматический газоредуцирующий пункт: Патент на изобретение №2613772, приоритет от 29 декабря 2014 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 21 марта 2017г.

23. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Адаптивная система автоматической коррекции работы станций катодной защиты: Патент на изобретение № 2621882, приоритет от 17 августа 2016 г, Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 07 июня 2017 г.

24. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Программа автоматизированного контроля, обработки данных и аварийного оповещения объектов сетей газораспределения: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2017661451 по заявке №2017615335 от 02 июня 2017г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 октября 2017 г.

25. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Программа для микропроцессорных блоков в системе сбора и передачи информации параметров работы газораспределительных пунктов: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2017661581 по заявке №2017615663 от 14 июня 2017г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 октября 2017 г.

26. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Устройство мониторинга коррозии подземных трубопроводов на гибкой подложке: Патент на полезную модель № 173992, приоритет от 02 июня 2017 г.. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 22 сентября 2017 г.

27. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Панарин М.В. Устройство регулирования турбодетандера с адаптацией к внешней нагрузке: Патент на изобретение № 2634161, приоритет от 13 июля 2016 г, Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 24 октября 2017 г.

28. Воробьев Н.Ю., Пахомов С.Н., Царьков Г.Ю., Степанов В.М., Панарин М.В. Устройство для регулирования давления в газовой магистрали с турбодетандером: Патент на изобретение № 2645821, приоритет от 06 июня 2017 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 28 февраля 2018 г.

29. Степанов В.М., Пахомов С.Н. Анализ конструктивных схем электротеплотехнических устройств системы для регулирования давления в газовых и паровых магистралях // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып.8. - С.75-79.

30. Пахомов С.Н. Определение работоспособности электротеплотехнической системы регулирования давления в распределительных пунктах // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып.8. - С.80-83.

31. Степанов В.М., Горелов Ю.И., Пахомов С.Н. Математическое моделирование детандер-генераторной установки подогревом природного газа // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып.12.Ч.2 - С.115-120.

32. Пахомов С.Н. Определение структуры и функциональных связей электромеханических и электротехнических систем автономных источников электроэнергии для собственных нужд объектов газораспределительных сетей // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. Вып.6. - С.407-411.