

**На правах рукописи**



**ПАШКИН Василий Валериевич**

**ЭНЕРГОРЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
ГАЗА**

**Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Уфа-2024**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на кафедре «Электротехника и электрооборудование предприятий».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Шабанов Виталий Алексеевич**  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Корнилов Владимир Юрьевич**  
профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

кандидат технических наук, доцент  
**Сухачев Илья Сергеевич**  
доцент кафедры Электроэнергетика  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва

Защита диссертации состоится 27 сентября 2024 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.10 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте <https://uust.ru/dc/dissertations/>.

Автореферат разослан

«\_\_\_» \_\_\_ 20\_\_\_ года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

И.И. Ямалов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Добываемый газ на существующих добычных комплексах Крайнего Севера должен иметь строго определённые режимные параметры на различных участках технологической цепи: от газового промысла до единой системы газоснабжения. Одним из важнейших параметров в технологическом комплексе газового промысла является температура газа. Для приведения газа к необходимой температуре в настоящее время получил наибольшее распространение способ охлаждения аппаратами воздушного охлаждения (АВО) газа. Установки охлаждения газа, представляющие собой многодвигательную систему электроприводов АВО газа являются основными потребителями электроэнергии газового промысла, вследствие их высокой установленной мощности по отношению к другим потребителям. Относительное потребление электроэнергии электроприёмниками установок АВО газа достигает 70% от общего потребления газопромыслового объекта. В подавляющем большинстве на существующих установках охлаждения газа регулирование температуры газа происходит дискретными переключениями вентиляторов и пусками электродвигателей. Данному способу присущи высокие энергозатраты в стационарных режимах и дополнительные потери электроэнергии в пусковых режимах. Существующие способы частотного управления электроприводами АВО газа для регулирования температуры газа не учитывают свойства и особенности двухступенчатых секций АВО газа, несмотря на распространённость таких технологических схем в добычных комплексах. Разработка схемы управления электроприводом, расчёт и выбор оптимальных частот вращения электроприводов последовательно соединённых АВО газа и объединённых в охлаждающую секцию, является актуальной задачей повышения энергоэффективности электротехнического комплекса воздушного охлаждения газа.

Одним из основных технологических осложнений в технологическом процессе добычи и подготовки газа является льдо-гидратообразование в теплообменных секциях. Существующий и самый распространённый способ ингибиторного воздействия на добываемый газ является не экологичным и повышает взрывопожароопасность газопромыслового объекта. Реверсирование рабочих колёс вентиляторов и перенаправление потоков тёплого воздуха на теплообменные секции приводит к нагреву и оттаиванию грунтов многолетней мерзлоты с дальнейшей деформацией фундаментов АВО газа, а также к захвату атмосферных осадков в теплообменные секции и на корпусы электродвигателей. Поэтому разработка способа управления, позволяющего минимизировать риск образования зон локального переохлаждения добываемого газа и льдо-гидратообразования в теплообменных секциях является актуальной задачей.

При эксплуатации АВО газа возникают аэродинамическое взаимовлияние вентиляторов и рециркуляция потоков воздуха через диффузоры резервных вентиляторов. При этом происходит раскручивание рабочего колеса в обратном направлении или авторотация вентилятора. Пуск электродвигателя в условиях

авторотации вентилятора сопровождается режимом противовключения электродвигателя, продолжительным протеканием пускового тока, инерционными ударами, тепловым износом изоляции и снижением ресурса работы электродвигателя. Существующие устройства механического удержания рабочих колес вентиляторов снижают надёжность эксплуатации АВО газа в условиях Крайнего Севера и не получили широкого распространения. А применяемые системы плавного пуска не позволяют обеспечить пуск электродвигателя в широком диапазоне скоростей авторотации. Для повышения ресурса электродвигателей актуальной является разработка энергетически эффективного способа пуска с подхватом вентиляторов АВО газа в режиме авторотации.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Вопросами исследования, расчёта и конструирования регулируемых электроприводов и систем управления АВО посвящены научные работы А.М. Абакумова, С.В. Алимova, О.В. Крюкова, В. А. Шабанова, А.К. Арабского, Э.Г. Талыбова, Г.Ю. Коловертнова, С.В. Щербинина, И.И. Артюхова, И.И. Аршакяна, Р.В. Белянкина, Е.В. Устинова, В.С. Петрушина и других ученых.

Но, несмотря на глубину научной проработки, ряд вопросов требует дальнейших исследований.

### **Основания для выполнения работы.**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по предоставленному автору гранту № 24 генерального директора ООО «Газпром добыча Ямбург» на обучение в аспирантуре и соответствует направлению НИОКР «Технологии энергосбережения и сокращения потерь при добыче газа» Паспорта инновационного развития ПАО «Газпром» до 2025 года.

**Цель и задачи.** Цель работы – снижение энергетических затрат и увеличение ресурса работы электротехнического комплекса воздушного двухступенчатого охлаждения газа в динамических и стационарных режимах работы.

Достижение поставленной цели возможно путём решения ряда задач:

1. Разработка способа пуска частотно-регулируемого электропривода вентилятора АВО газа в режиме авторотации на основе исследования электродинамических и тепловых процессов в электроприводе, обеспечивающего минимизацию потерь электроэнергии и увеличения ресурса электродвигателей.

2. Разработка способа оптимального управления взаимосвязанного электропривода секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением

3. Структурно-параметрический синтез системы управления ЧРП АВО газа при двухступенчатом охлаждении.

4. Разработка методики расчёта оптимальных параметров частотно-регулируемого электропривода по критерию минимального расхода электроэнергии.

5. Разработка моделей электропривода и исследование на их основе

динамических и стационарных режимов работы электроприводов АВО газа, оценка на основе разработанных моделей показателей экономии электроэнергии и снижения теплового износа изоляции электродвигателей при использовании предложенных решений.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработан способ комбинированного частотного пуска электропривода вентилятора в режиме авторотации, основанный на функции подхвата преобразователя частоты, отличающийся тем, что определяется направление и скорость вращения ротора, плавно снижается частота до нулевого значения с последующим частотным пуском, позволяющий обеспечить пуск в широком диапазоне скоростей авторотации при минимуме потерь мощности и износе изоляции (патент РФ на изобретение № 2656846).

2. Впервые получено уравнение теплового КПД секции двухступенчатого охлаждения газа, вычисляемого на основе теплового КПД каждого из АВО в отдельности, определяемых по тепловой характеристике.

3. Разработан способ управления частотно-регулируемым приводами секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением, отличающийся тем, что выбор оптимальных по параметру минимизации потребления электрической энергии электродвигателями частот вращения вентиляторов охлаждающей секции АВО газа основывается на расчёте максимального теплового КПД охлаждающей секции и расчёте оптимальных тепловых КПД каждого из аппаратов АВО в отдельности, позволяющий снизить потребление электроэнергии электродвигателями охлаждающей секции (свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615234).

4. Установлено, что работа двух вентиляторов одного АВО газа с одной скоростью вращения минимизирует аэродинамическое взаимовлияние и рециркуляцию воздушных потоков, тем самым снижает вероятность преждевременной выработки ресурса электродвигателей.

5. Показано, что распределение тепловой нагрузки вдоль охлаждающей секции устраняет неблагоприятные зоны интенсивного отбора тепла и снижает риск льдо-гидратообразований в теплообменной части, а также обеспечивает идентичные условия эксплуатации обоих АВО секции, и как следствие, эксплуатационные изменения тепловых характеристик происходят равномерно для обоих АВО.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в следующем:

1. Результаты работы дополняют теорию частотно-регулируемого электропривода и позволяют решать задачи управления электроприводами вентиляторных и насосных установок в условиях аэродинамического и гидравлического противодействия среды с авторотацией исполнительных механизмов.

2. Разработанные технические решения позволяют снизить потребление

электроэнергии электроприводами в технологическом процессе охлаждения газа и регулировании температуры газа на выходе охлаждающей секции, а также уменьшить износ изоляции при пуске электродвигателей в электротехническом комплексе воздушного охлаждения газа.

3. Изложенные в диссертации теоретические изыскания и разработанные имитационные модели используются в учебном процессе на кафедре «Электротехника и электрооборудование предприятий» ФГБОУ ВО УГНТУ, а предложенные технические решения в производственном процессе ООО «Газпром добыча Ямбург».

**Основные методы научных исследований.** Для решения поставленных задач использованы положения и методы теории электрических машин, теории электропривода, математического анализа, математического и компьютерного моделирования электротехнических систем, теории аэродинамики вентиляции, теории оптимального управления, теории автоматического управления. При разработке математической модели и моделировании электропривода методами дифференциального и интегрального исчисления, аналитическими и численными методами применялись программные пакеты Matlab R2017b, MathCad 15.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Способ пуска электропривода АВО газа в режиме авторотации, основанный на подхвате преобразователя частоты электропривода и частотном разгоне.

2. Способ оптимального управления частотно-регулируемыми электроприводами двухступенчатой секции АВО газа, целевая функция оптимального управления частотно-регулируемыми электроприводами АВО газа по критерию минимума потребляемой мощности.

3. Результаты структурно-параметрического синтеза системы управления электроприводами АВО двухступенчатой охлаждающей секции.

4. Методика расчёта оптимальных частот питания электроприводов частотно-регулируемого электропривода по критерию минимального расхода электроэнергии.

5. Результаты исследований, проведённые на разработанных имитационных моделях подтверждающие:

- снижение потребления электроэнергии и потерь мощности в динамических и статических режимах работы
- снижение относительного износа изоляции в динамических режимах.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях: XV Всероссийская НТК «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» ДНДС-2023 (ЧувГУ И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, 2023), Международная конференция ICOECS 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (УГАТУ, г. Уфа, 2019), семинар на базе Wintershall Dea GmbH в соответствии с Планом проведения учебных программ для руководителей и специалистов компаний

Группы Газпром, реализуемых совместно с зарубежными компаниями (Германия, г. Кассель, 2019); XI Всероссийская НТК «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (ЧувГУ имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, 2018); I, II, III Международная (IV, V, VI Всероссийская) НТК «Электропривод. Электротехнологии и электрооборудование предприятий» (УГНТУ г. Уфа, 2013, 2015, 2017, 2023); IV Молодежная НПК ООО «Газпром добыча Ямбург», (г. Новый Уренгой, 2013); IX Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Новые технологии в газовой промышленности» (Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва 2011); Межрегиональном НТС «Проблемы автоматизации и управления в нефтегазовом комплексе» (УГНТУ, г. Уфа, 2011); IV Открытой НТК молодых специалистов и работников ООО «Газпром добыча Астрахань», (г. Астрахань, 2011); III Всероссийской НТК «Электропривод. Электротехнологии и электрооборудование предприятий» (УГНТУ, г. Уфа, 2011); II Всероссийской НПК молодых специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ»: «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», (г. Москва, 2010); Международной НТК «Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств» (УГНТУ, г. Уфа, 2010); II Всероссийской НТК молодых специалистов ООО «Газпром ПХГ», (г. Саратов, 2010).

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликованы 34 печатные работы, в том числе 4 в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, 1 патент на изобретение и 2 свидетельства РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В работах, выполненных в соавторстве, соискателем лично получены следующие результаты:

- в работах [9, 11] выполнены исследования условий пуска электродвигателей АВО газа в режиме авторотации вентилятора, произведено моделирование процесса пуска;

- в работе [4] произведены расчёты и выявлены основные факторы, влияющие на величину удельного потребления электроэнергии УАВО газа, в результате моделирования произведён анализ потерь электроэнергии в пусковых режимах;

- в работах [2, 5, 12, 16] предложен способ определения скорости вращения ротора при пуске и способы подхвата преобразователя частоты при авторотации вентилятора, произведено моделирование динамики электропривода при частотном останове и частотном пуске;

- в работах [3, 8, 15] на основе разработанной программы произведены расчёты и оценка износа изоляции электродвигателя в процессе пуска в режиме авторотации вентилятора, произведён расчёт ресурсосберегающего эффекта от применения подхвата ротора и частотного пуска.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста объёмом 127 страниц, заключения, списка литературы из 121 наименований, 5 приложений. Общий объём диссертации 163 страницы, включая 62 рисунка и 24 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулированы цель и задачи исследования, изложены методы исследования, указаны положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна, показана практическая значимость работы, сообщается об апробации работы и публикациях, излагаются представления автора о степени изученности темы, о неисследованных аспектах.

**В первой** главе приведён обзор системы электроснабжения, техники и технологии воздушного охлаждения газа в добывающем комплексе, в частности, охлаждение компримированного для подготовки к транспорту природного газа. Ретроспективный анализ потребления электрической энергии установками охлаждения газа указывает на высокую установленную мощность установки АВО газа, достигающий до 70 % мощности потребляемой всем добывающим комплексом. При анализе выявлены основные факторы, влияющие на потребление электрической энергии: технологические режимы и температура наружного воздуха (термобарические условия), конструкция и материал рабочих колёс вентиляторов, факторы эксплуатации: сезонная регулировка угла атаки рабочих колёс, ремонтные и регламентные работы.

Приводятся особенности эксплуатации АВО газа в условиях Крайнего Севера. Одна из существенных проблем эксплуатации является льдогидратообразование с закупориванием теплообменных трубок охлаждающей секции в результате переохлаждения газа ниже точки росы или точки гидратообразования. Второй проблемой освящаемой в данной работе является рециркуляция потоков воздуха через резервные вентиляторы. Аэродинамическое взаимовлияние вентиляторов и «ветровые» поля являются факторами, влияющими на ресурс работы электродвигателей. При пуске электродвигателя в условиях авторотации вентилятора возникает режим противовключения электродвигателя, что в свою очередь приводит к ряду негативных электромеханических и тепловых последствий для двигателя.

Одним из направлений энергосбережения является оптимальное управление взаимосвязанного электропривода УАВО газа с двухступенчатым охлаждением (рисунок 1). Двухступенчатые системы охлаждения с точки зрения управления имеют существенные отличия, т.к. выходная температура газа первого АВО одновременно является входной для второго. Данное обстоятельство позволяет подойти к регулированию электроприводами АВО газа одной секции с точки зрения энергетической эффективности, т.к. температура газа между двумя секциями и тепловые производительности секций может быть выбрана на основе тепловых характеристик и создаваться при различных вариантах работы вентиляторов.

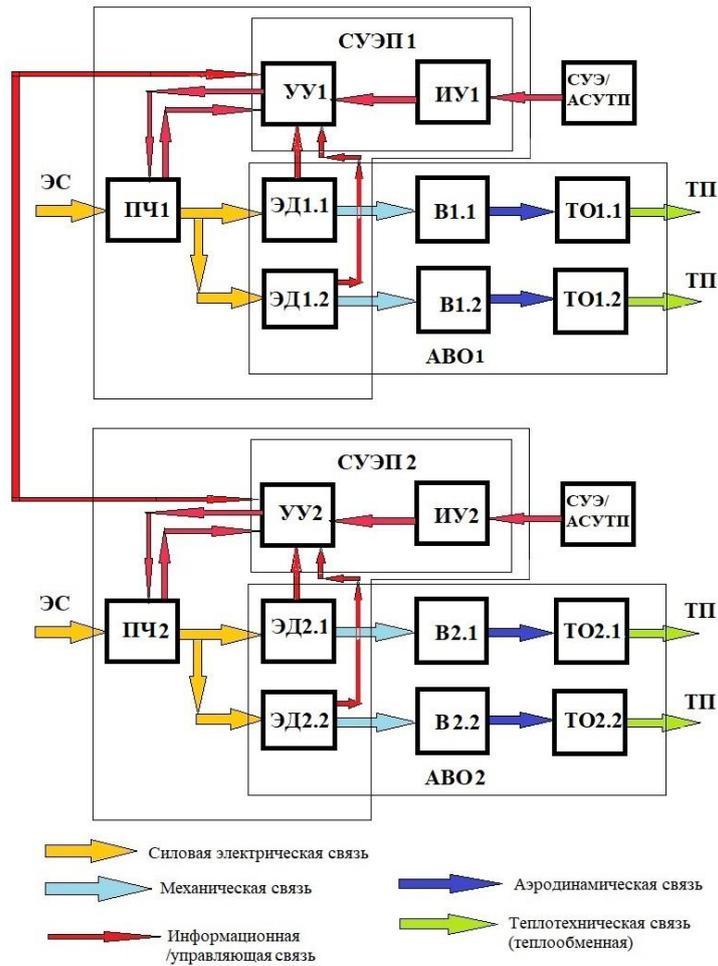


Рисунок 1 – Структурная схема взаимосвязанного электропривода АВО газа

**Во второй главе** рассмотрены электромеханические процессы в электроприводе в динамических режимах в условиях воздействия рециркуляционных потоков воздуха, предложены способ подхвата преобразователя частоты для электропривода вентилятора в режиме авторотации.

Пуск электропривода вентилятора в режиме авторотации состоит из двух этапов: торможения и разгона с нулевой скорости вращения. Пуск вентилятора АВО газа в режиме авторотации приводит к режиму противовключения электродвигателя, что существенно увеличивает время разгона, ускоряет тепловой износ и приводит к досрочной выработке ресурса электродвигателя. При скоростях обратного вращения больше критического значения момент, развиваемый электродвигателем недостаточен для преодоления момента сопротивления, что приводит к длительному протеканию пускового тока по обмоткам статора и ротора и отключению двигателя тепловыми защитами, либо к выходу его из строя.

В результате произведенных расчётов и моделирования установлено, что пуск вентилятора, рабочее колесо которого вращается в обратную сторону, значительно продолжительнее пуска из состояния покоя. Что приводит к повышенному нагреву обмотки статора электродвигателя.

Произведённый анализ процесса пуска в режиме авторотации для способов комбинированного пуска («торможение противовключением – прямой пуск», «динамическое торможение – прямой пуск», «динамическое торможение – плавный пуск», «динамическое торможение – частотный пуск», «частотное торможение – частотный пуск») показал, что при скольжении авторотации больше значения  $s=1,4$  произвести успешный пуск возможно только применением частотных способов.

На основе анализа способов комбинированного пуска предложен способ управления электроприводом в динамических режимах основанный на подхвате преобразователя частоты. Способ подхвата заключается в измерении частоты вращения ротора путём измерения частоты ЭДС обмотки статора и определении направления вращения ротора, по отношению к направлению вращения в рабочем режиме, путём определения последовательности чередования фаз ЭДС обмотки статора. При вращении ротора в обратном направлении на выходе преобразователя частоты происходит формирование системы трёхфазных напряжений с частотой соответствующей частоте вращения ротора в обратном направлении с дальнейшим плавным снижением частоты до нулевого значения и частотным пуском с нулевой частоты вращения и с такой последовательностью чередования фаз, которая соответствует вращению в рабочем режиме.

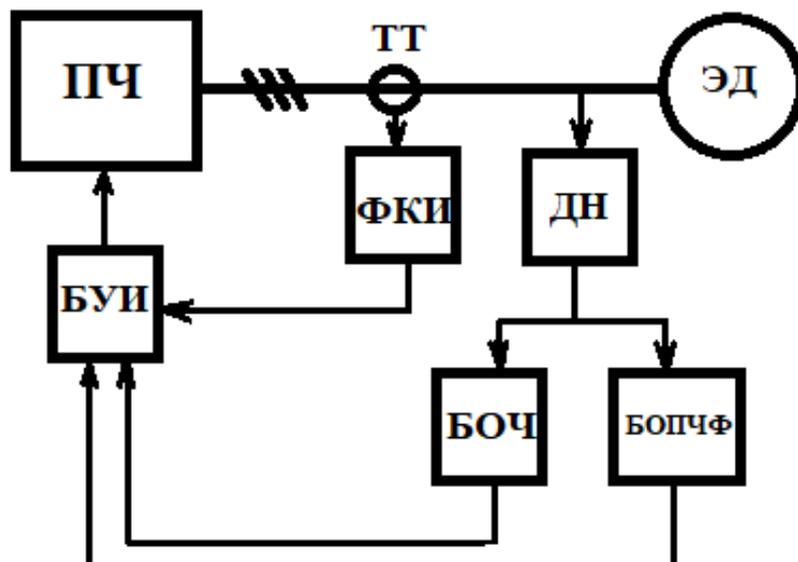


Рисунок 2 – Схема, реализующая предлагаемый способ подхвата преобразователя частоты (патент РФ на изобретение № 2 656 846 С1)

В результате моделирования пусковых режимов при различных скоростях авторотации для разработанного способа комбинированного пуска «частотное торможение – частотный пуск» получены временные характеристики тока статора, угловой скорости и потерь мощности в обмотке статора пуске (рисунок 3).

Установлено, что разработанный способ позволят обеспечить пуск в широком диапазоне скоростей авторотации при минимуме потерь мощности и износе изоляции.

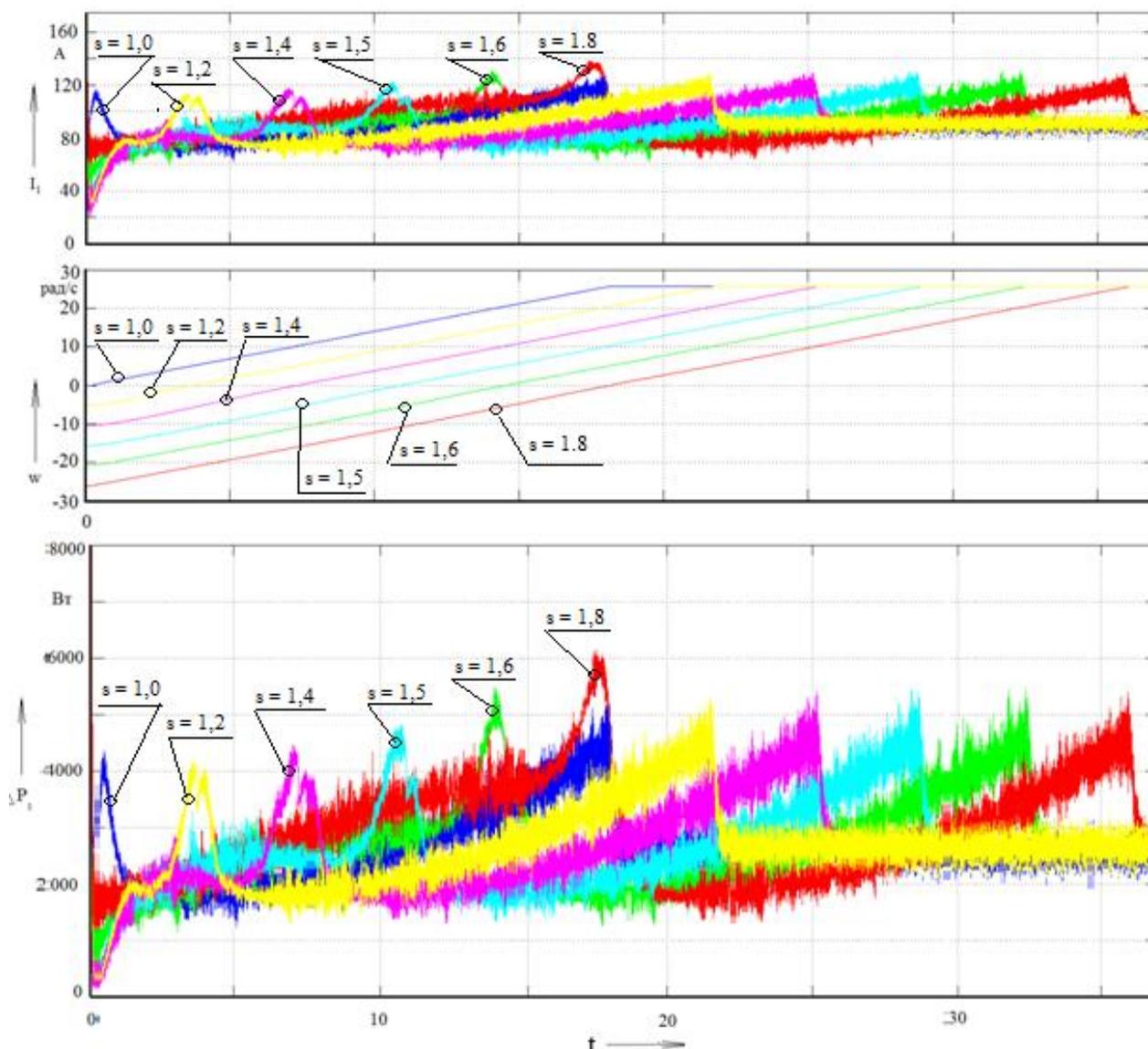


Рисунок 3 – Временные характеристики тока статора, угловой скорости и потерь мощности в обмотке статора при частотном останове и последующим частотном пуске при различных величинах начального скольжения

**В третьей главе** исследованы способы энергоресурсосбережения электроприводов АВО газа в стационарных режимах, а именно способ оптимального управления частотно-регулируемыми электроприводами АВО газа и выбор оптимальных электрических параметров при заданных технологических параметрах.

В результате анализа тепловых характеристик выведено уравнение общего теплового КПД секции из двух АВО:

$$\eta_c = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \cdot \eta_2$$

где  $\eta_1$  – тепловой КПД первого по ходу газа АВО (1-ая ступень охлаждения)

$\eta_2$  — тепловой КПД второго по ходу газа АВО (2-ая ступень охлаждения)  
 $\eta_c$  — тепловой КПД охлаждающей секции.

Суммарная потребляемая мощность ЧРП секции двухступенчатого охлаждения с учётом кубической зависимости потребляемой мощности от частоты питания электродвигателя при питании электродвигателей АВО1 частотой  $f_1$ , электродвигателей АВО2 частотой  $f_2$

$$P_{\Sigma} = 2 \cdot P_{\text{ном.}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_c}\right)^3 + 2 \cdot P_{\text{ном.}} \cdot \left(\frac{f_2}{f_c}\right)^3 \quad (1)$$

где  $P_{\text{ном.}}$  — номинальная мощность электродвигателя;

$f_1$  — частота питания электродвигателей первого по ходу газа АВО;

$f_2$  — частота питания электродвигателей второго по ходу газа АВО;

$P_{\Sigma}$  — суммарная потребляемая мощность электродвигателями охлаждающей секции.

Критерием оптимизации является

$$P_{\Sigma} \rightarrow \min \quad (2)$$

Целевая функция:

$$\psi = \eta_1^{3,75} + \eta_2^{3,75} \quad (3)$$

Поиск оптимальных тепловых КПД сводится к нахождению минимума следующей целевой функции  $\psi$

Оптимальный тепловой КПД

$$\eta_1^{2,75} - \frac{(\eta_c - \eta_1)^{2,75}}{(1 - \eta_1)^{4,75}} \cdot (1 - \eta_c) = 0 \quad (4)$$

Оптимальные частоты питания электродвигателей вычисляются по выражениям

$$\begin{cases} \frac{f_1}{f_c} = \left(\frac{\eta_1}{\eta_{\text{ном.}}}\right)^{1,25} \\ \frac{f_2}{f_c} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_{\text{ном.}}}\right)^{1,25} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_1 = f_c \cdot \left(\frac{\eta_1}{\eta_{\text{ном.}}}\right)^{1,25} \\ f_2 = f_c \cdot \left(\frac{\eta_2}{\eta_{\text{ном.}}}\right)^{1,25} \end{cases} \quad (5)$$

На основе предложенной методики определения оптимальных частот вращения электроприводов АВО газа при двухступенчатом охлаждении предложен оптимизационный алгоритм, реализованный в программной среде Mathcad.

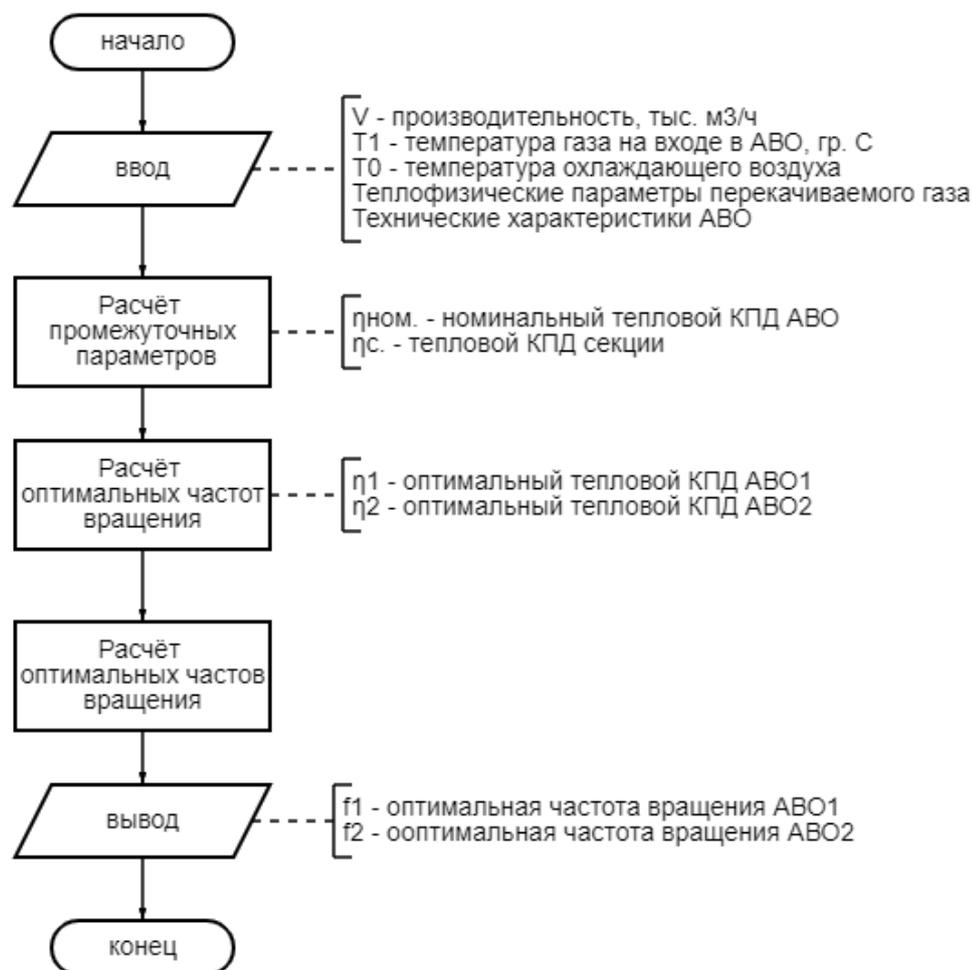


Рисунок 3 – Структурная схема оптимизационного алгоритма (свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615234)

**Четвертая глава посвящена** обоснованию показателей снижения энергетических затрат для разработанного способа управления электроприводами охлаждающей секции в стационарных режимах работы электротехнического комплекса воздушного охлаждения газа и ресурсосберегающего эффекта, определяемого уменьшением износа изоляции в динамических режимах работы при реализации разработанного способа комбинированного пуска «частотно торможение – частотный пуск».

Снижение теплового износа обмоток статора при пуске в режиме авторотации и использовании функции подхвата ЧРП вычисляется по выражению

$$Z = \frac{\tau^2 \cdot e^{b \cdot \Theta_H}}{b \cdot \Theta_{HAЧ} \cdot (k^2 - 1) \cdot t_{\Pi}} \cdot \left( 4 \cdot e^{\frac{b \cdot \Theta_{HAЧ} (k^2 - 1) \cdot t_{\Pi}}{2 \cdot \tau}} + e^{\frac{b \cdot \Theta_{HAЧ} (k^2 - 1) \cdot t_{\Pi}}{\tau}} \cdot \left( 1 + \frac{t_{\Pi}}{\tau} \right) - 5 - \frac{t_{\Pi}}{\tau} \right) \quad (6)$$

где  $\tau$  – постоянная времени нагрева обмотки статора.

$b$  – коэффициент, учитывающий класс изоляции.

$\Theta_n$  – предельно допустимая температура изоляции, °С;

$t_n$  – длительность пуска, с,

$k$  – кратность тока при пуске (или самозапуске);

$\Theta_{нач}$  – начальное значение температуры обмотки, °С.

Выражение (6) позволяет оценить изменение относительного уменьшения срока службы изоляции при нагревании пусковым током за время прямого пуска относительно нагревания номинальным током за то же время.

Определение уменьшения срока службы изоляции производится по математической модели (рисунок 4) с помощью программы для ЭВМ. Исходными данными являются время пуска, величина токовой перегрузки, допустимое превышение температуры, начальная температура, плотность тока в обмотке и кратность перегрузки.

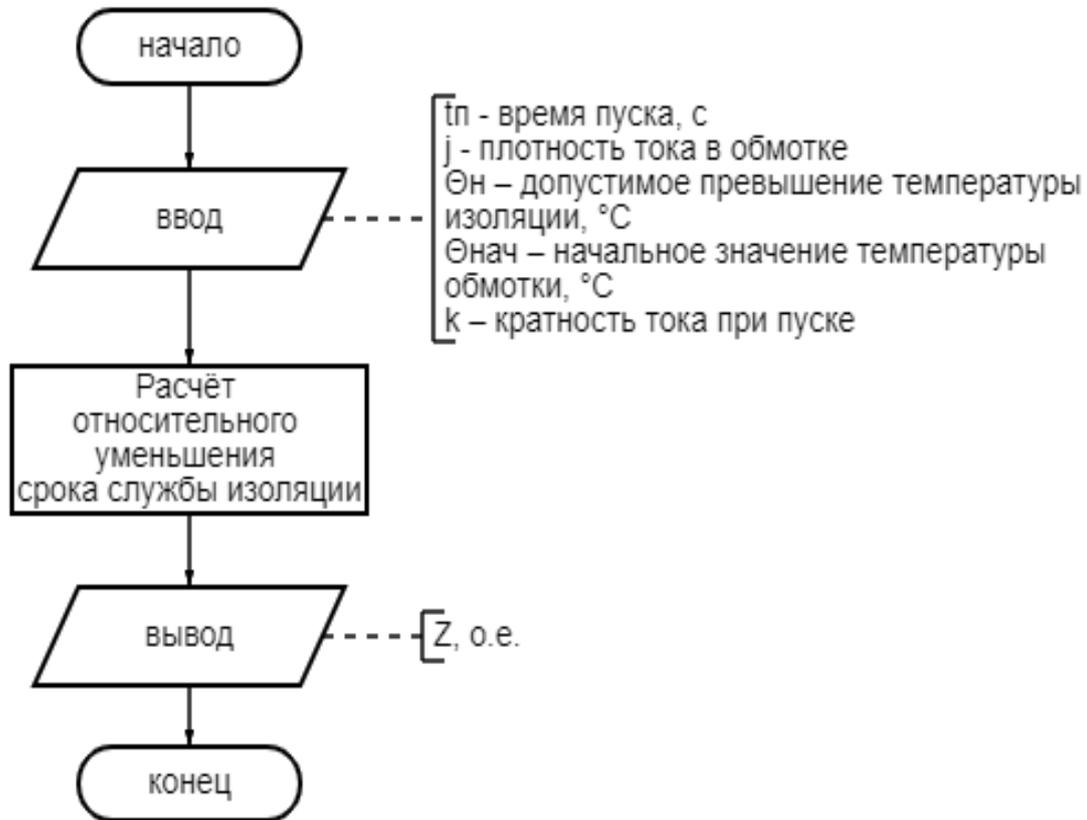


Рисунок 4 – Структурная схема математической модели оценки износа изоляции (свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615235)

Таблица 1 – Результаты расчёта относительного износа изоляции при реализации способа частотного останова и частотного пуска

Начальное скольжение (начальная скорость вращения, рад/с)	Время (время торможения + время разгона), с	Относительное уменьшение срока службы изоляции z, о.е.	Изменение износа по сравнению с пуском из состояния покоя $\Delta z$ , %
$s = 1,0 (0)$	10 (0 + 10)	$36,25 \cdot 10^6$	3,4
$s = 1,1 (-2,62)$	11 (1 + 10)	$36,26 \cdot 10^6$	3,4
$s = 1,2 (-5,24)$	12 (2 + 10)	$36,27 \cdot 10^6$	3,4
$s = 1,3 (-7,86)$	13 (3 + 10)	$36,28 \cdot 10^6$	3,3
$s = 1,4 (-10,48)$	14 (4 + 10)	$36,29 \cdot 10^6$	3,3
$s = 1,5 (-13,1)$	15 (5 + 10)	$36,31 \cdot 10^6$	3,3
$s = 1,6 (-15,72)$	16 (6 + 10)	$36,32 \cdot 10^6$	3,2
$s = 1,7 (-18,34)$	17 (7 + 10)	$36,33 \cdot 10^6$	3,2
$s = 1,8 (-20,96)$	18 (8 + 10)	$36,34 \cdot 10^6$	3,2
$s = 1,9 (-23,58)$	19 (9 + 10)	$36,35 \cdot 10^6$	3,1
$s = 2,0 (-25,76)$	20 (10 + 10)	$36,37 \cdot 10^6$	3,1

По результатам, приведённым в таблице 1, видно, что с ростом скорости вращения рабочего колеса в режиме авторотации возрастает значение относительного уменьшения срока службы изоляции z для нерегулируемого электропривода. Для частотно-регулируемого электропривода, как видно из таблицы 1, значение z практически не зависит от скорости вращения в режиме авторотации. При этом снижение относительного срока службы изоляции частотно-регулируемого электропривода по сравнению с прямым пуском в режиме авторотации будет тем больше, чем больше скорость в режиме авторотации.

Произведены расчёты для случаев возможных отклонений напряжения от номинального значения при пуске электродвигателя. Результаты расчётов показывают, что поддержание на выводах трансформатора напряжения равного  $1,05 \cdot U_{ном.}$  снижает относительный износ изоляции до 1,5% за время прямого пуска по сравнению с пусками при номинальном напряжении в диапазоне скольжений авторотации от 0 до 1,5.

Для оценки экономии электроэнергии от использования способа оптимального управления электроприводами произведены расчёты для фактических режимов работы АВО газа дожимной компрессорной станции, установленных на основе сезонных наблюдений.

В результате произведенных расчётов установлено, что при эквивалентных тепловых КПД охлаждающей секции, использование разработанного способа оптимального управления электроприводами двухступенчатой секции АВО газа,

позволяет достичь экономии электроэнергии до 65 % по отношению к регулированию дискретными переключениями электродвигателей вентиляторов.

Частотное управление электроприводами АВО газа обеспечивает высокую точность регулирования температуры газа на выходе охлаждающей секции. При использовании оптимального управления взаимосвязанного электропривода секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением достигается равномерное распределение тепловой нагрузки между последовательными АВО газа. При этом распределение тепловой нагрузки обеспечивает равномерный и плавный теплообмен вдоль охлаждающей секции, что исключает интенсивный локальный отбор тепла и снижает риск возникновения льдо-гидратообразований в теплообменнике.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами и выводами работы являются:

1. Разработан и запатентован способ комбинированного частотного пуска электропривода вентилятора в режиме авторотации, основанный на функции подхвата преобразователя частоты, позволяющий обеспечить пуск электродвигателя в широком диапазоне скоростей авторотации, уменьшить потери мощности до 7-10% и термический износ изоляции до 3,4 % по отношению с непосредственным подключением электродвигателя к сети.

2. Разработаны имитационные модели и исследованы на их основе различные способы комбинированного пуска, включающие стадии торможения: противовключением, динамическое, плавное, частотное и последующего пуска: прямой, плавный, частотный. На основе моделирования установлено, что температура двигателя на момент выхода на номинальную скорость вращения может превысить допустимое значение по классу изоляции, а при скольжениях более 1,4 пуск электродвигателя возможен только применением частотного метода.

3. Получено уравнение теплового КПД секции двухступенчатого охлаждения газа, вычисляемого по тепловым КПД каждого из АВО в отдельности, которые в свою очередь определяются на основе тепловой характеристики АВО газа по параметрам требуемой температуры газа на выходе секции, температуры наружного воздуха, фактической температуры газа на входе установки охлаждения газа и расхода газа по охлаждающей секции.

4. Разработан способ оптимального управления взаимосвязанного электропривода секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением, позволяющий снизить потребление электроэнергии электродвигателями охлаждающей секции.

5. Выполнен структурно-параметрический синтез системы управления для способа оптимального управления взаимосвязанного частотно-регулируемого электропривода АВО газа с двухступенчатым охлаждением с улучшенными энергетическими показателями.

6. Разработаны и реализованы в зарегистрированной программе для ЭВМ оптимизационный алгоритм и методика расчёта оптимальных параметров оптимального управления ЧРП АВО газа для заданных технологических параметров установки охлаждения газа по критерию минимума потребляемой мощности. В результате расчёта показано, что при использовании данной методики достигается экономия потребляемой мощности до 65% по отношению к способу дискретных переключений

7. Доказана технологическая эффективность предложенного способа оптимального управления взаимосвязанного электропривода секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением, т.к. при работе двух вентиляторов одного АВО газа с одной скоростью вращения минимизируется аэродинамическое противодействие и исключается рециркуляция воздушных потоков, а распределение тепловой нагрузки вдоль охлаждающей секции устраняет неблагоприятные зоны интенсивного отбора тепла и снижает риск льдо-гидратообразований в теплообменной части.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Перечнем ВАК:**

1. Пашкин В. В., Шабанов В. А., Ивашкин О. Н. Оптимизационный алгоритм управления частотно-регулируемым электроприводом в электротехническом комплексе двухступенчатого охлаждения газа // Научный журнал «Электротехнические и информационные комплексы и системы». 2023. № 4. Т. 19. С. 75-83. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-75-83>.

2. Пашкин В. В. Способ подхвата преобразователя частоты электропривода вентилятора в режиме авторотации / В. А. Шабанов, О. Н. Ивашкин // Научный журнал «Электротехнические и информационные комплексы и системы». 2019. № 1. С. 26-32. <http://www.ugues.ru/files/ЭИКС/1-tom-15-2019-ii-var.pdf>

3. Пашкин В. В. Ресурсосберегающий эффект от использования функции подхвата преобразователя частоты электропривода при авторотации вентиляционных установок / В. А. Шабанов, О. Н. Ивашкин // Журнал «Энергобезопасность и энергосбережение». 2019. № 2. С. 34-39.

4. Пашкин В. В. Анализ потерь электроэнергии в электроприводе аппарата воздушного охлаждения газа / В. А. Шабанов, О. Н. Ивашкин // Научный журнал «Электротехнические и информационные комплексы и системы». 2014. №1. С. 18-24. URL: <http://www.ugues.ru/files/eics/7.pdf>

### Патенты:

5. Пат. РФ № 2 656 846 С1, Н02Р 1/30 (2006.01), Н02Р 27/06 (2006.01) Способ подхвата преобразователя частоты / В. В. Пашкин, В. А. Шабанов, О. Н. Ивашкин. Заявл. 10.04.2017. Опубл. 07.06.2018. Бюл. № 16.

### Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

7. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2015615234 «Программа расчёта оптимальных частот вращения электроприводов АВО газа в двухступенчатой схеме охлаждения газа» / В. В. Пашкин, О. Н. Ивашкин, В. А. Шабанов М.: Роспатент. 2015.

8. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2015615235 «Расчёт относительного уменьшения срока службы изоляции электродвигателей» / В. В. Пашкин, О. Н. Ивашкин, В. А. Шабанов М.: Роспатент. 2015.

### В других изданиях (всего 26 шт.)

9. Pashkin V. V. The mode of anti-switching of the electric drive during the reverse rotation of the impeller of the fan and pumping units / V. A. Shabanov, V. V. Pashkin, O. N. Ivashkin // IEEE 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2019. Paper\_97. DOI: [10.1109/ICOECS46375.2019.8949947](https://doi.org/10.1109/ICOECS46375.2019.8949947)

10. Пашкин В. В. Способ управления частотно-регулируемым приводом АВО газа при двухступенчатом охлаждении / В. А. Шабанов, О. Н. Ивашкин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2019. № 3. С. 177-194. <http://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2019-3-177-194>

11. Шабанов В. А. Анализ пуска электроприводов автоматического воздушного охлаждения газа в режиме противовключения / В. А. Шабанов, Пашкин В. В. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013. №1. С. 27-36. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov\\_15.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_15.pdf)

12. Пашкин В. В., Ивашкин О. Н. Динамика ЧРП аппаратов воздушного охлаждения газа при подхвате колеса вентилятора в режиме авторотации // Сборник научных трудов XV Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (ДНДС-2023) / – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2023. С. 209 - 210.

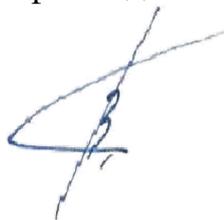
13. Пашкин В. В. Структурно-параметрический синтез системы управления ЧРП АВО газа при двухступенчатом охлаждении // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов VIII Международной научно-технической конференции / отв. ред. М. И. Хакимьянов; зам. отв. редактора П. А. Хлюпин; редкол.: Р. Т. Хазиева, М. Д. Иванов, Г. Е. Димукашева. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2023. – С. 65 – 69.

14. Пашкин В. В. Энергоресурсосберегающие решения при эксплуатации электропривода вентиляторных установок газовых промыслов / В. А. Шабанов, О. Н. Ивашкин // Электротехнические комплексы и системы: материалы международной научно-практической конференции. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. С. 199-205.

15. Пашкин В. В., Ивашкин О. Н. Оценка ресурсосберегающего эффекта регулируемого электропривода // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. С. 430 – 434.

16. Пашкин В. В., Ивашкин О. Н., Шабанов В. А. Применение функции «подхвата» преобразователя частоты для пуска электроприводов вентиляторных установок в режиме авторотации // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: V-й межвузовский сборник научных трудов / редкол.: В. А. Шабанов и др.– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018 г. С. 70 – 73.

Соискатель



В. В. Пашкин