

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

На правах рукописи



ПАШКИН Василий Валериевич

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

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Шабанов Виталий Алексеевич

Уфа-2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава I. Характеристика электротехнического комплекса АВО газа, как объекта исследования. Постановка задач.....	13
1.1 Аналитический обзор состояния электроснабжения и электропривода установок АВО газа.....	13
1.1.1 Электроснабжение УАВО и электропривод АВО газа.....	14
1.1.2 Анализ потребления электрической энергии.....	13
1.2 Основные сведения об оборудовании и технологии охлаждения газа на газовых промыслах.....	18
1.2.1 Технологическое обеспечение процесса охлаждения компримированного газа.....	18
1.2.2 Требования к охлаждению газа.....	21
1.2.3 Аппараты воздушного охлаждения и рабочие колеса вентиляторов.....	23
1.3 Особенности эксплуатации АВО газа в условиях Крайнего Севера.....	25
1.3.1 Льдо-гидратообразование. Способы борьбы с ЛГО.....	25
1.3.2 Рециркуляционные потоки воздуха, авторотация и взаимное аэродинамическое влияние колёс вентиляторов.....	27
1.4 Проблемы управления электроприводами АВО газа.....	29
Выводы по главе 1 и постановка задач исследования.....	37
Глава 2 Исследование и разработка способов энергоресурсосбережения электроприводов АВО газа в динамических режимах.....	40
2.1 Динамика электропривода АВО газа при авторотации вентилятора.....	40
2.1.1 Потери мощности в электродвигателе.....	47

2.1.2 Нагрев АД при пуске в режиме авторотации вентилятора.....	52
2.2 Пуск электропривода АВО в режиме авторотации вентилятора.....	53
2.2.1 Способы торможения электропривода в режиме авторотации вентилятора.....	53
2.2.2 Способы пуска электропривода.....	55
2.2.3 Разработка комбинированных способов пуска электропривода вентилятора в режиме авторотации.....	56
2.2.4 Разработка способа торможения и бездатчикового определения скорости и направления вращения в способе подхвата частоты.....	58
2.3 Моделирование электромеханических процессов в электроприводе вентилятора при пуске в режиме авторотации.....	64
2.4 Моделирование динамического торможения и последующего прямого пуска вентилятора АВО газа.....	75
2.5 Моделирование ЧРП АВО газа при авторотации вентилятора.....	83
2.6 Анализ потерь электроэнергии в электроприводе АВО газа при различных способах пуска.....	86
Выводы по главе 2.....	98
Глава 3 Исследование и разработка способов энергоресурсосбережения электроприводов АВО газа в стационарных режимах.....	100
3.1 Температурные преобразования в охлаждающей секции АВО газа	100
3.2 Регулирование температуры газа на выходе АВО газа изменением расхода охлаждающего воздуха.....	105
3.3 Особенности регулирования температуры на выходе секции АВО с двухступенчатым охлаждением.....	108
3.4 Вывод уравнения тепловой КПД секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением.....	110
3.5 Разработка способа оптимального управления и методики определения параметров оптимального управления ЧРП секции АВО	113

газа с двухступенчатым охлаждением.....	
3.6 Структурно-параметрический синтез системы управления ЧРП АВО газа при двухступенчатом охлаждении.....	117
Выводы по главе 3.....	120
Глава 4 Показатели энергоресурсосбережения исследуемых режимов.....	121
4.1 Снижение теплового износа обмоток статора при использовании функции подхвата ЧРП при пуске в режиме авторотации.....	121
4.2 Экономия электроэнергии использованием способа управления ЧРП при двухступенчатом охлаждении газа.....	128
Выводы по главе 4.....	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение «Способ подхвата преобразователя частоты».....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ В Исходный текст программы «Программа расчёта оптимальных частот вращения электроприводов АВО газа в двухступенчатой схеме охлаждения газа».....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Исходный текст программы «Расчёт износа изоляции электродвигателей».....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Справки о внедрении.....	162

ВВЕДЕНИЕ

Ввод новых производственных мощностей в области добычи газа в России непременно связан с освоением новых площадей, находящихся вдали от существующей инженерной инфраструктуры и от развитых энергетических узлов. Ввод новых мощностей предполагает, как пуск газовых промыслов (ГП) и месторождений, так и строительство дожимных компрессорных станций (ДКС) в составе с газоперекачивающими агрегатами (ГПА) при естественном снижении пластового давления. Данное обстоятельство сопровождается увеличением энергетических нагрузок на существующие энергетические узлы, и свидетельствует о повышении роли энергосберегающих решений при проектировании и эксплуатации объектов промышленного электрохозяйства.

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 газопромышленного 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 корпуса 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 исследований.

Вопросами исследования, расчёта и конструирования регулируемых электроприводов и систем управления АВО посвящены научные работы А.М. Абакумова, С.В. Алимова, 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 процессы 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 обеих АВО секции, и как следствие, эксплуатационные изменения тепловых характеристик происходят равномерно для обеих 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. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием общепринятых математических методов, а также методов математического и компьютерного моделирования, подтверждена экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических и научно-практических конференциях и семинарах (НТК, НПК, НТС) и семинарах: Международной конференции ICOECS 2019 (УГАТУ, г. Уфа, 2019), семинаре 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); XV Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» ДНДС-2023 (ЧувГУ И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, 2023); XI Всероссийской НТК «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» ИТЭЭ-2018 (ЧувГУ имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, 2018); I, II, III Международной (IV, V, VI Всероссийской) НТК «Электропривод. Электротехнологии и электрооборудование предприятий» (УГНТУ г. Уфа, 2013, 2015, 2017); IV Молодежной 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 (приложение А) и 2 свидетельства РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ (приложение Б).

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

Глава I. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АВО ГАЗА, КАК ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

1.1 Аналитический обзор состояния электроснабжения и электропривода установок АВО газа

1.1.1 Электроснабжение УАВО и электропривод АВО газа

Электроснабжение установки АВО газа осуществляется от двухтрансформаторных комплектных подстанций (КТП), которые, в свою очередь получают питание от закрытого распределительного устройства ЗРУ-6 кВ по кабельным линиям 6 кВ. На каждой КТП установлено по два трансформатора 6/0,4 кВ, каждый из которых питает свою секцию шин 0,4 кВ. От секций шин 0,4 кВ получают питание электродвигатели вентиляторов АВО газа, количество которых колеблется от 40 до 52 шт., и вспомогательное оборудование (освещение КТП, обогрев КТП и т.д.). Типовая схема электроснабжения УАВО представлена на рисунке 1.1.

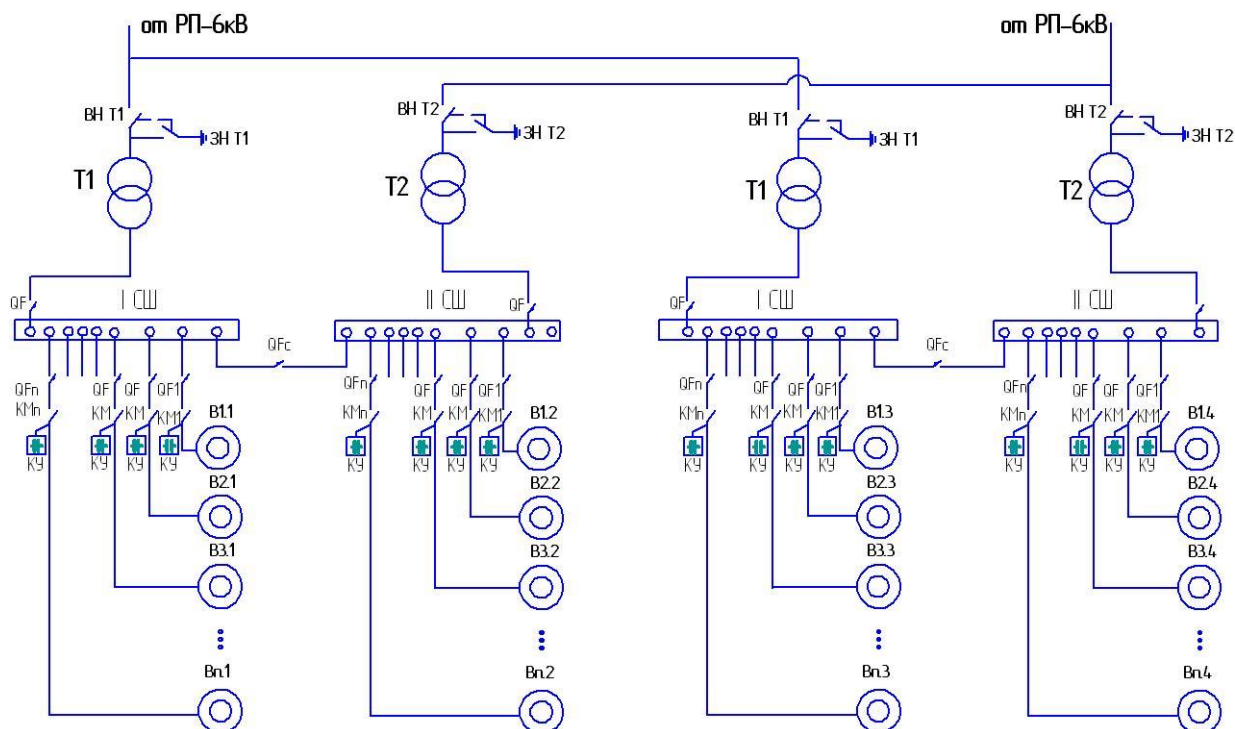


Рисунок 1.1 – Типовая схема электроснабжения УАВО ДКС

Компенсация потребляемой, электроприводом вентиляторов, реактивной мощности, осуществляется индивидуальными КУ типа КЭ, КПС мощностью 36 кВАр, представляющими собой отдельные банки статических конденсаторов, работающих совместно с приводом вентилятора. Включение и отключение КУ осуществляется контактором вентилятора.

Электроприводами АВО газа являются асинхронные тихоходные электродвигатели специального исполнения типа ВАСО (В – взрывозащищенный; А – асинхронный; С – специальный; О – обдуваемый), внешний вид которого представлен на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Электродвигатель ВАСО16-14: а) внешний вид на станине с колесом ГАЦ-50; б) ротор.

Данный тип двигателей имеет высокую инерционность ротору, вследствие массивности и специфичной геометрии ротора, т.к. отношение диаметра ротора к длине бочки ротора составляет 3:1.

1.1.2 Анализ потребления электрической энергии

Для контроля количества потребленной электрической энергии на охлаждение газа, на ГП организован учет электроэнергии, потребленной АВО газа. Учет электроэнергии осуществляется по отходящим от ЗРУ линиям 6 кВ, по показаниям счетчиков.

Снижение энергетических затрат в электротехнических комплексах газопромысловых объектов заключается в анализе факторов, влияющих на потребление электроэнергии, количественной оценки вклада каждого из факторов, разработки и реализации технических решений на основе технико-экономических расчётов. Ниже приведён анализ влияния различных параметров на электропотребление УАВО на основании фактических данных 2006...2012 годов для УАВО КЦ №1 ДКС ООО «Газпром добыча Ямбург». Для анализа потребления электроэнергии использованы данные счётчиков технического учёта, установленных в ЗРУ-6 кВ. Фактические данные приведены в приложении.

Основным показателем эффективности использования электроэнергии является показатель удельного расхода электроэнергии (УРЭ) на единицу продукции. Единицей измерения УРЭ является 1 кВт*ч/тыс. м³.

$$\text{УРЭ} = W/V \quad (1.1)$$

где W – потреблённая электроэнергия, тыс. кВт*ч

V – объём добытого газа, млн. м³.

Графики потребления электроэнергии и УРЭ УАВО по месяцам за 2006...2012 годы представлены на рисунке 1.3.

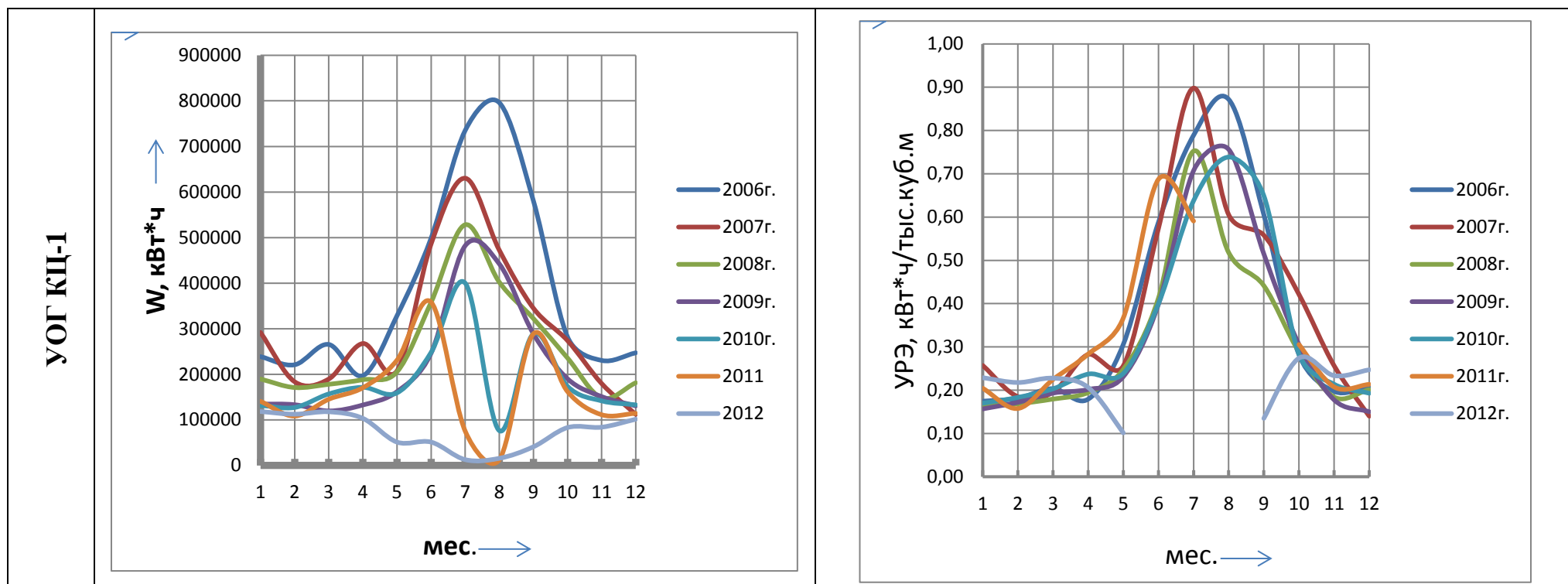


Рисунок 1.3 – Графики потребления электроэнергии и УРЭ УОГ
газового промысла по месяцам за 2006...2012 годы.

Как видно из графиков потребление электроэнергии УАВО имеет сезонный характер с ярко выраженным максимумом в летние месяцы. При определении степени влияния тех или иных условий на потребление электроэнергии удобно использовать следующие группы факторов [1].

а) Показатели добычи газа. Эта группа факторов является наиболее сложно учитываемой, так как задание на добычу газа носит диспетчерский характер и показатели добычи газа зависят не только от технологических режимов отдельных промыслов, но и всего добывающего комплекса, газотранспортной системы и единой системы газоснабжения. Это существенно сказывается на тепловой нагрузке АВО газа и на их энергетических показателях, т.к. количество необходимого для охлаждения воздуха напрямую зависит от количества охлаждаемого газа. Этим можно объяснить некоторые колебания потребления электроэнергии за периоды с января по апрель, т.к. необходимость поставки газа изменяется в зависимости от спроса потребителями.

б) Конструктивные факторы. В первоначальных проектных вариантах АВО газа типа 2АВГ-75, 2АВГ-100 оснащались металлическими рабочими колёсами типа «Торнадо» Т-50, УК-2М массой 500 кг. С развитием композитных материалов распространение получают колёса со стеклопластиковыми композитными лопастями производства ОАО «Гидроаэроцентр» г. Жуковский типа ГАЦ-50 массой 120 кг, с улучшенными аэродинамическими и массогабаритными показателями. Это объясняет существенное снижение потребления энергии УАВО КЦ-1, КЦ-2 после замены в 2007-2010 годах по отношению к 2006 году.

в) Температура наружного воздуха. Имеет существенное влияние, т.к. температура охлаждающего воздуха связана с потреблением электроэнергии АВО газа в гиперболической зависимости: чем холоднее месяц, тем больше глубина охлаждения и меньше необходимый расход воздуха через теплообменники, т.е. меньшее количество работающих вентиляторов. Данным фактором объясняется «снижение потребления за летний период

2010 года, характеризующийся наиболее низкой среднемесячной температурой летнего времени.

г) Эксплуатационные факторы. В данную группу входят сезонное регулирование углов атак лопастей, загрязнение рёбер теплообменников, замятость рёбер [2], производство ремонтных работ, в том числе длительных при плановых профилактических остановках промысла. Последним из указанных обстоятельств объясняется «провал» графика потребления электроэнергии в летние месяцы.

1.2 Основные сведения об оборудовании и технологии охлаждения газа на газовых промыслах

1.2.1 Технологическое обеспечение процесса охлаждения компримированного газа

Газовый промысел – единый технологический комплекс добычи, сбора, подготовки, компримирования и транспортировки газа от скважины до подачи в газотранспортную систему [3].

Одним из энергозатратных технологических процессов в добыче и подготовке газа промысла является охлаждения газа. Охлаждение газа производится после компримирования газа на ГПА компрессорных цехов (КЦ) ДКС и на выходе из УКПГ. Охлаждение после компримирования газа на ГПА необходимо для обеспечения установленной массовой производительности ГПА следующей ступени компримирования. Охлаждение компримированного на последней стадии газа на ДКС перед подачей на УКПГ необходимо для обеспечения требуемых условий осушки в абсорберах до регламентированной точки росы в соответствии с [4]. На выходе УКПГ газа охлаждается до температуры $0...5$ °С для минимизации температурного воздействия на грунты многолетней мерзлоты, изоляцию трубопровода межпромыслового коллектора.

На рисунке 1.3 представлена структурная схема технологической цепи газового промысла с двумя ступенями компримирования.

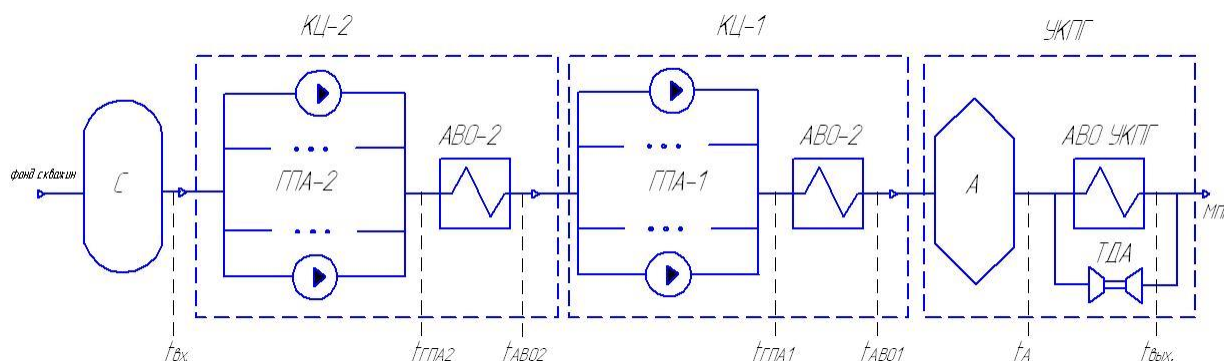


Рисунок 1.3 – Структурная схема технологической цепи газового промысла с двумя ступенями компримирования

На рисунке обозначено: С – сепаратор, А - абсорбер, ТДА – турбодетандерный агрегат, МПК – межпромысловый коллектор.

Параметры работы каждой из звеньев существенно зависят от параметров работы предыдущего звена. Основные эксплуатационные параметры каждого из звеньев согласно технологическому регламенту (ТР) приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики температурных звеньев ГП согласно ТР

показатель		ГПА КЦ-2	УАВО КЦ-2	ГПА КЦ-1	УАВО КЦ-1	УКПГ	УАВО УКПГ	
продукт		«сырой» газ, очищенный от мех. примесей (не более 5 мг/м ³) и капельной жидкости (не более 15 мг/м ³)					товарный газ	
Давлен ие, МПа	на входе	0,4...0,92	2,8...1,5	1,5...2,8	4,6...5,6	4,6...5,6	4,6...5,6	
	на выходе	1,5...2,8		4,6...5,6				
Температура, °С	зима	на входе	+8..+13	+100... +130	+15..+36	+85..+140	+15..+23	+20..+25
		на выходе	+100... +130	+15...25	+85..+140	+15..+20	+20..+25	0..-2
	лето	на входе	+8..+13	+110... +140	+19..+36	+80...+135	+20...+23	+20...+23
		на выходе	+110... +140	+19..+36	+80...+135	+20...+23	+20...+23	-3,5..+11,3
Причина изменения температуры		Адиабатно е сжатие газа	Воздуш. охлажд.	Адиабатно е сжатие газа	Воздуш. охлажд.	Теплообм ен с реагент.	Воздуш. охлажд.	

После компримирования газ под рабочим давлением около 7,5 МПа проходит по трубчатым теплообменным секциям АВО-1 – АВО-N.

В настоящее время наибольшее распространение получил способ воздушного охлаждения газа с использованием атмосферного воздуха в качестве охлаждающего агента на УАВО, которые состоят из групп АВО газа, подключенных параллельно к входному и выходному коллекторам газа. Внешний вид установки аппарата воздушного охлаждения газа представлен на рисунке 1.4



Рисунок 1.4 – Степень охлаждения установки АВО газа

На ДКС газ компримируется до требуемого для процесса осушки в абсорберах УКПГ. Компримирование газа на ДКС обеспечивает высокую степень сжатия газа, поступающего с кустов скважин и, как следствие высокую температуру сжатого газа, что сказывается на конструктивном исполнении установки охлаждения газа. Согласно [5] при температуре газа компримированного газа выше 40 °С на объектах газа применяются двухступенчатые схемы охлаждения. При этом УАВО конструируются с последовательно включенными парами АВО образующие параллельно подключенные секции. Схема двухступенчатой УАВО представлена на рисунке 1.5

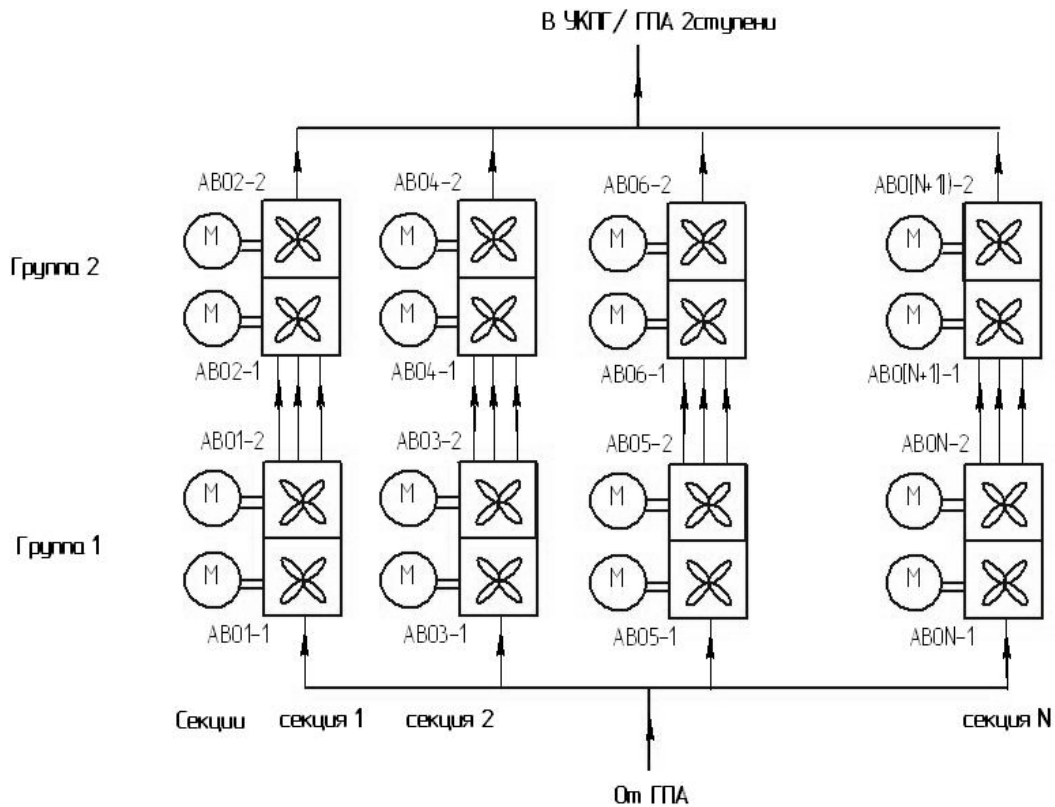


Рисунок 1.5 – Схема двухступенчатой УАВО

При отсутствии регулируемого электропривода регулирование температуры газа на выходе из УАВО в оперативном порядке осуществляется в основном дискретными переключениями двигателей вентиляторов, а также при регулировании массовой производительности по газу УАВО закрытием/открытием охлаждающих. Из неоперативных способов можно выделить сезонное регулирование угла атаки лопастей вентиляторов и сезонное регулирование жалюзей над теплообменными секциями.

1.2.2 Требования к охлаждению газа

Требования к охлаждению газа, отражаемые в технологическом регламенте эксплуатации газового промысла определяются следующими критериями:

- а) технологический критерий – температура газа на выходе из УАВО.

Значения требуемых температур на выходе АВО различных ступеней технологического процесса согласно ТР представлены в таблице 1.1.

В процессе компримирования газа на ДКС требования по температуре газа обусловлены техническими характеристиками работы ГПА. Так температура на входе ГПА-16 ДКС-02 «Урал» должна быть на уровне минус 30...плюс 45°С [6]. При нарушениях в работе УАВО возможно повышение температуры газа на всасе ГПА до значений, превышающих максимально допустимые (60 °С) с последующим аварийным остановом ГПА.

Обеспечение требуемой температуры газа на входе в УКПГ требуется в целях обеспечения оптимальных условий осушки газа и баланса «расход - потери» абсорбента диэтиленгликоля (ДЭГ). Повышение температуры контакта «газ - ДЭГ» на 1 °С приводит к повышению точки росы по влаге примерно на 0,9 °С, что негативно сказывается на качестве товарного газа. Повышение температуры контакта «газ - ДЭГ» приводит к дополнительным потерям ДЭГа, вследствие увеличения растворимости ДЭГа с последующим уносом паро-капельной фазы с товарным газом [7].

Обеспечение требуемой температуры газа на выходе УКПГ

б) противоаварийный критерий – недопущение льдогидратообразования (ЛГО). При температуре газа ниже минус 10 °С существует высокий риск отложения ЛГО в теплообменных трубках АВО. В целях снижения риска ЛГО в настоящее время важное значение имеет оперативный и ответственный контроль температуры газа на выходе каждого АВО, переключение и чередование работы вентиляторов и при необходимости подача метанола.

1.2.3 Аппараты воздушного охлаждения и рабочие колеса вентиляторов

АВО газа – теплообменный аппарат, предназначенный для охлаждения продукта (добываемого газа) нагнетаемым осевыми вентиляторами хладагентом (воздухом). Теплообменник состоит из набора биметаллических трубок с оребренной поверхностью. В случае отключения вентилятора газ

охлаждается вследствие естественного охлаждения или свободной конвекции.

Конструктивные элементы УАВО представлены на рисунке 1.6.

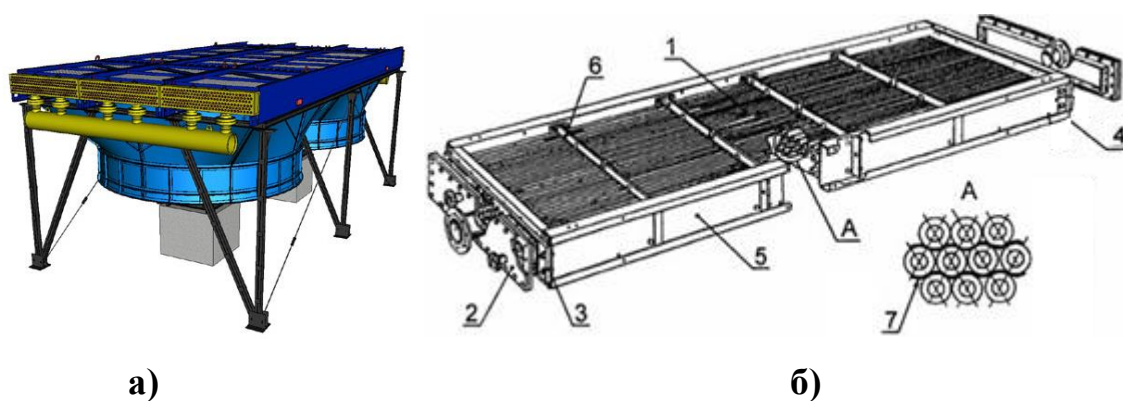


Рисунок 1.6 – Конструктивные элементы УАВО: а) аппарат воздушного охлаждения типа 2АВГ-75С; б) конструкция теплообменной секции: 1 - трубный пучок; 2 - крышка камеры; 3 и 4 - неподвижная и подвижная трубные доски; 5 - боковая стенка; 6 - балка; 7 - дистанционирующий элемент.

В настоящее время в промышленности используются следующие типы АВО:

а) малопоточные АВМ, зигзагообразные 1АВЗ, зигзагообразные 2АВЗД с рециркуляцией нагретого воздуха, применяемые для конденсации или охлаждения жидких, газообразных и парообразных сред (кислород, воздух, водород, кислоты, хладонов) нефтеперерабатывающей, нефтехимической и смежных отраслей промышленности;

б) АВГ-В для охлаждения вязких, 1АВГ-ВВ для охлаждения высоковязких продуктов в нефтеперерабатывающей, нефтехимической и смежных отраслях промышленности;

в) 1АВГ-160, 2АВГ-75, 2АВГ-100, блочные АВГБС-83(100) для охлаждения природного газа и конденсации жидких углеводородов. Технические характеристики аппарата 2АВГ-75С приведены в таблице 1.2;

Таблица 1.2 – Технические характеристики 2АВГ-75С

Наименование параметра	Значение
Коэффициент оребрения труб	20
Давление, расчетное, МПа	7,5
Количество теплообменных секций	3
Количество рядов труб в секции	6
Число ходов по трубам в секции	1
Количество труб	528
Длина труб, м	12
Число ходов по трубам	3
Поверхность теплообмена по оребренным трубам, м ²	9930
Диаметр колеса вентилятора, м	5

В настоящее время на объектах добычи и транспортировки газа получают наибольшее распространение композитные стеклопластиковые колёса типа ГАЦ-50 (производства ЗАО «Гидроаэроцентр»), устанавливаемые взамен металлических типа Т50-4 «Торнадо», УК-2М [8]. Основные технические параметры рабочего колеса ГАЦ-50 приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Основные технические параметры колеса ГАЦ-50

Наименование параметра	Значение
Диаметр рабочего колеса, м	4,98
Диаметр ступицы, м	1,28
Количество лопастей	4
Скорость вращения, мин ⁻¹	250
Масса рабочего колеса	120
Номинальный расход воздуха, тыс. м ³ /час	510
Номинальный статический напор, Па	210 – 220

1.3 Особенности эксплуатации АВО газа в условиях Крайнего Севера

1.3.1 Льдо-гидратообразование. Способы борьбы с ЛГО

ЛГО в внутрипромысловых трубопроводах и технологических аппаратах газовых промыслов является самым распространенным технологическим осложнением в условиях добычи Крайнего Севера.

Гидраты газов представляют собой твердые соединения, в которых молекулы газа при определенных давлениях и температурах заполняют структурные пустоты кристаллической решетки, образованной молекулами воды с помощью прочной водородной связи [7].

В настоящее время наиболее широкое распространение имеют ингибиторные методы борьбы с ЛГО. Наибольшее и подавляющее распространение на месторождениях Крайнего Севера России получил метанол [7]. Метанол – антигидратный реагент, используемый как для предупреждения гидратообразования, так и для ликвидации возникающих гидратных пробок. Метанол токсичен, пожароопасен и неэкологичен.

В процессе разработки и внедрения регулируемых электроприводов АВО газа для условий Крайнего Севера одной из главных и перспективных задач становится предотвращение (либо минимизация риска) ЛГО средствами управления электроприводом.

В патенте на изобретение [9] описан способ автоматического управления процессом охлаждения сырого природного газа с реверсированием второго по ходу вентилятора в целях нагрева трубного пучка рециркулируемым нагретым воздухом. Алгоритм работы предполагает определение частоты и направления вращения электродвигателя при помощи ЧРП по вычисленному минимальному значению температуры (на построенной кривой гидратообразования) наружной поверхности стенок теплообменных трубок, при котором гидратообразование минимально. Схема реализации представлена на рисунке 1.7.

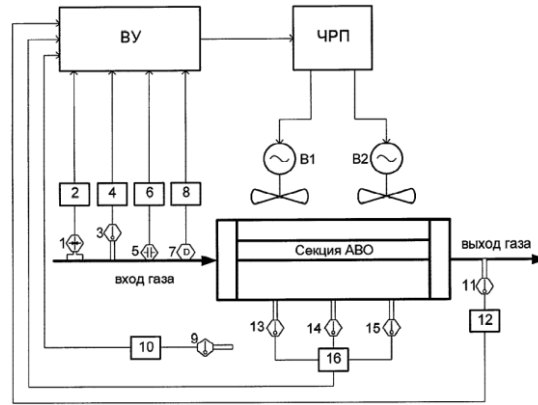


Рисунок 1.7 – Схема реализации способа автоматического управления процессом охлаждения сырого природного газа [9]

Аналогичное, по технической сути, решение описано в [10], в котором предлагается свести вероятность ЛГО к минимуму, используя специальный гидратобезопасный режим работы АВО, заключающийся в том, что второй по ходу газа вентилятор реверсируется. Описание процесса температурных преобразований представлено на рисунке 1.8.

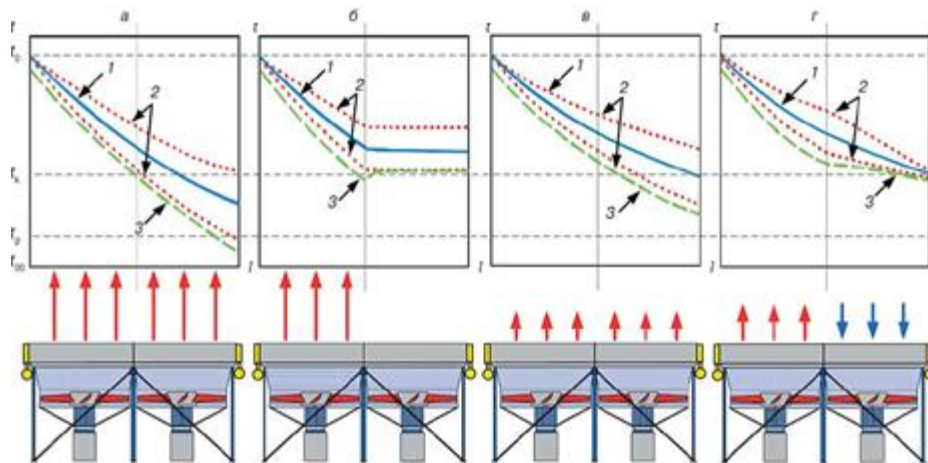


Рисунок 1.8 – Описание процесса температурных преобразований при реверсировании электродвигателя [10]:

Регулирование: *а* и *б* – дискретное соответственно при работе двух и одного вентиляторов; *в* и *г* – частотное соответственно при обычном и безгидратном режимах. Температура: *1* – средняя в трубном пучке; *2* – газа в верхней и нижней трубках; *3* – стенки нижнего ряда труб; *t0* – температура газа на входе в АВО; *tк* – температура в коллекторе на выходе из УОГ; *tг* – температура гидратообразования

В рассмотренных решениях отсутствует оценка риска теплового воздействия от направленного воздушного потока на грунты многолетней

мерзлоты и дальнейшего снижения несущей способности свайных оснований АВО газа. Это обстоятельство серьёзно ограничивает применение реверса на объектах добычи газа Крайнего Севера. В [5] приводятся требования, что при реверсе электродвигателей должны быть предприняты конструктивные решения по теплоизоляции грунта от воздействия рециркулирующих потоков воздуха. Также данные решения не учитывают захват атмосферных осадков (снега) в полость теплообменников, что может повлечь за собой отложения влаги и льда на электродвигатель с повышением риска аварийной ситуации. При управлении электроприводом в режиме реверса необходимы механические реверсивные характеристики колеса, что также является задачей, требующей экспериментальных исследований.

Очевидно, что снижение интенсивности теплоотбора от газа в секции, является средством профилактики ЛГО. В настоящей работе автором ставится задача снижения риска образования ЛГО путём устранения зон интенсивного отбора тепла при равномерном распределении тепловой нагрузки вдоль всей охлаждающей секции.

1.3.2 Рециркуляционные потоки воздуха, авторотация и взаимное аэродинамическое влияние колёс вентиляторов

Конструкция УАВО газа предполагает плотное и низкое расположение АВО, что создаёт условия для возникновения частичной рециркуляции тёплого воздуха. Этот поток воздуха попадает на лопасти соседнего вентилятора, что приводит к его раскручиванию в обратном направлении, если электродвигатель вентилятора отключён от сети [11, 12]. Образование рециркулирующего потока воздуха представлено на рисунке 1.9.

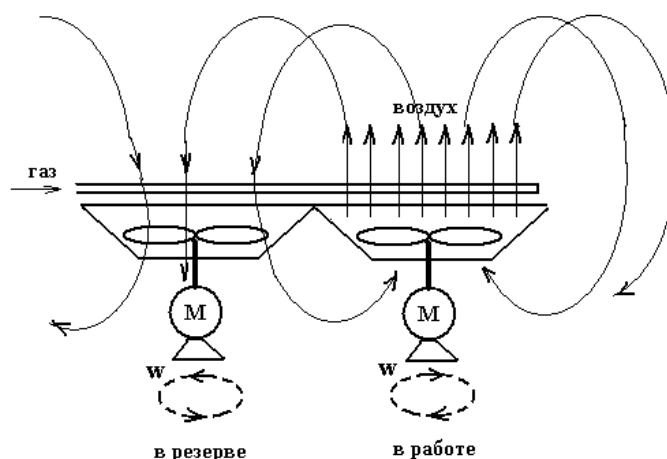


Рисунок 1.9 – Возникновение рециркуляционного потока

Вращение вентилятора в обратную сторону под воздействием рециркулирующих потоков воздуха называется авторотацией.

Пуск электродвигателя вентилятора в режиме авторотации сопровождается режимом противовключения. При этом в электродвигателе происходят ряд негативных последствий по сравнению с пуском электродвигателя из состояния покоя [11 – 13]:

- увеличивается значение пускового тока, вследствие зависимости тока асинхронного двигателя от начального скольжения;
- увеличивается время протекания пускового тока, т.к. в первоначальный момент времени электродвигатель оказывается в режиме торможения противовключением;
- растут потери мощности за время пуска и происходит интенсивный нагрев электродвигателя, приводящее к тепловому износу изоляции;
- вращающий момент от рециркулирующего потока воздуха достигает критической величины, при которой момент, развиваемый электродвигателем, оказывается недостаточным для его преодоления;
- скорость вращения рабочего колеса в режиме авторотации достигает критической величины, при которой торможение противовключением приводит к длительному протеканию пускового тока и отключению электродвигателя токовыми защитами.

В целом при вращении вала электродвигателя в обратном направлении изменяется характер нагрузки на подшипниковые узлы, т.к. изменяется направление нагрузки в осевом направлении. Работа в данном режиме значительно снижает ресурс подшипников.

В работе [14] процесс, сопровождающийся перетоками воздушной массы, назван «кластерным эффектом», т.е. существенным взаимным влиянием работающих вентиляторов и теплообменных модулей на скорости, расходы и температуры воздуха. В [14] проведенные исследования аэродинамики вентиляторов при наличии ветровых полей показали, что при отсутствии наружного ветра неравномерность расходов воздуха по отдельным теплообменным модулям и вентиляторам небольшая и составляет порядка 3 – 5%, а при натекании ветра наблюдается существенная неравномерность расходов воздуха через диффузоры вентиляторов. При ветре 30 м/с возможно падение расхода через вентиляторы до 30 – 45 % их номинальной производительности.

Решить проблему вращения рабочего колеса в режиме авторотации возможно установкой дополнительных противореверсных устройств. Противореверсные устройства реализуются в виде механизмов, удерживающих рабочее колесо от раскручивания в обратном направлении устройств или же устройств, выходящих из зацепления при вращении рабочего колеса в обратном направлении. Но установка дополнительных устройств приводит к снижению надёжности механизма, требует дополнительного обслуживания. Поэтому желательно применять такие решения, которые не снижают надёжность механизма и не приводят к усложнению обслуживания и эксплуатации механизма.

1.4 Проблемы управления электроприводами АВО газа

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа как объект управления представляют собой систему, осуществляющую тепловое взаимодействие

протекающего в теплообменниках газа и воздуха нагнетаемого электроприводными вентиляторами [15].

Проблемы управления как многодвигательной системы электроприводов установки АВО газа, так и каждого электропривода в отдельности можно классифицировать следующим образом:

- теплофизические: регулирование температуры газа при ограничении рисков возникновения ЛГО в теплообменных секциях;
- аэродинамические: рециркуляция потоков воздуха, сопровождающаяся авторотацией резервных вентиляторов;
- электротехнические: потребление электроэнергии электродвигателями при различных способах регулирования температуры газа, броски тока в динамических режимах.

На рисунке 1.10 приведена, предложенная автором, функциональная схема охлаждающей секции аналогичная приведённым в [16, 17, 18]. В схему добавлены связи взаимовлияния вентиляторов – давлением рециркулирующих потоков воздуха $P_{\text{рец.1}}$ и $P_{\text{рец.2}}$. В схеме представлены взаимосвязанные электрический, аэродинамический и тепловой блоки. На рисунке 1.11 указаны: ПРУ_{1.1} – ПРУ_{2.2} – пуско-регулирующие устройства (магнитный пускатель, частотный преобразователь), принимающие электроэнергию из сети с напряжением U_c и частотой f_c и передающие электродвигателям ЭД_{1.1} – ЭД_{2.2} электроэнергию напряжением $U_{1.1}$ – $U_{2.2}$ и частотой $f_{1.1}$ – $f_{2.2}$, соответственно. В свою очередь электродвигатели передают вентиляторам В_{1.1} – В_{2.2} вращающие моменты $M_{1.1}$ – $M_{2.2}$ и скорости вращения колеса $\omega_{1.1}$ – $\omega_{2.2}$. На лопастях вентиляторов установлены углы атаки $\alpha_{1.1}$ – $\alpha_{2.2}$. Вентиляторы направляют на теплообменники ТО_{1.1} – ТО_{2.2} АВО₁ и АВО₂ охлаждающий воздух с температурой $T_{\text{возд.}}$ и потоками $q_{1.1}$ – $q_{2.2}$, для охлаждения протекаемого газа с массовым расходом G_g и температурами на различных ступенях теплового блока $T_{\text{вх.}}$ – на входе в секцию, T_{12} – на выходе АВО₁ (первой ступени охлаждения), $T_{\text{вых.}}$ – на выходе из секции.

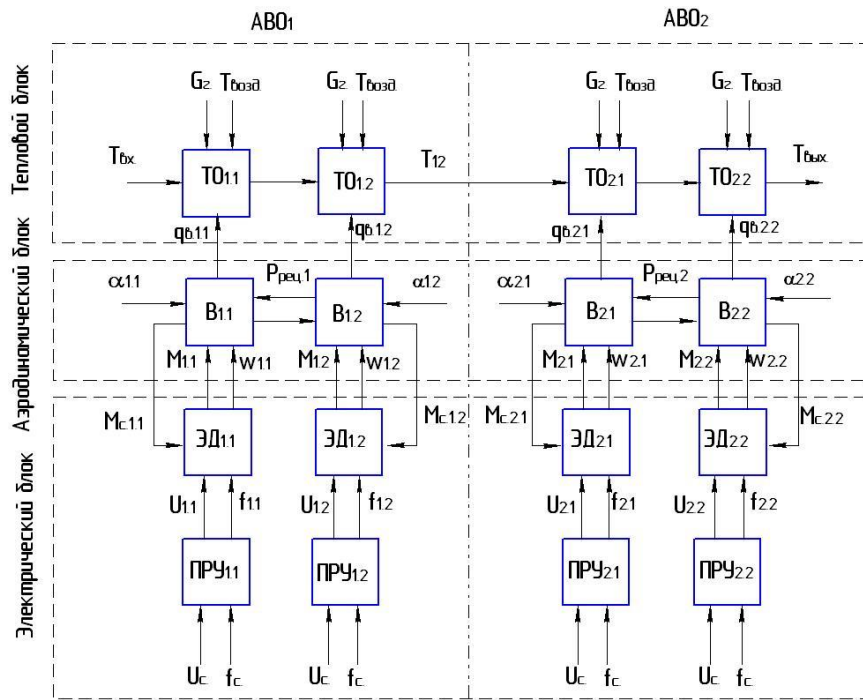


Рисунок 1.10 – Функциональная схема охлаждающей секции

В существующих и введённых ранее в эксплуатацию электроприводах УАВО, в большинстве является нерегулируемыми. Регулирование температуры газа на выходе УАВО, вследствие своей простоты реализации, основывается на способе дискретных переключений работающих электродвигателей [17, 18]. Нерегулируемый электропривод АВО имеет ряд существенных недостатков, таких как значительные и продолжительные пусковые токи, и продолжительное время пуска из-за большого момента инерции ротора электродвигателя и вентилятора.

Перечисленные недостатки, присущие нерегулируемому электроприводу АВО, накладывают следующие специфичные ограничения на эксплуатацию АВО:

1) во избежание наложения пусковых токов при оперативном регулировании температуры газа на выходе УАВО, пуск очередного двигателя разрешается, когда все остальные двигатели уже подключённые к электрической сети работают в установившемся режиме (разогнались до номинальной скорости). На практике оперативное управление АВО газа осуществляет технологический персонал, в основном не осведомлённый

проблемами электротехнического характера. Пуск производится без учёта возможного наложения пусковых токов. Остановы без учёта действия пусковых токов (при ошибочном включении оператором) влекут за собой отрыв контактов пусковой аппаратуры с возникновением электрической дуги при протекающих по ним 5-7 кратных токов;

2) пуск электродвигателя совместно с вентилятором допускается при суммарном моменте инерции агрегата не более $1550 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и моменте трогания не более $295 \text{ Н}\cdot\text{м}$ [19], т.е. при авторотации вентилятора успешный пуск электродвигателя возможен только для определённых критических значений скоростей обратного вращения;

3) в [20] указано требование: «в целях предотвращения инерционных ударов колеса вентилятора в момент пуска, колесо вентилятора не должно иметь в это время вращения в обратном направлении». Применяемые АВО газа не имеют конструктивных элементов по удержанию колеса, поэтому условие налагаемое инструкцией по эксплуатации имеет формальный характер.

В настоящее время разработан ряд схемотехнических решений по управлению электроприводом АВО газа. Ниже рассмотрены изобретения и полезные модели наиболее близкие по смыслу с исследуемой проблематикой.

В [21] предлагается отключать вентилятор секции теплообменника с наименьшим показателем эффективности с выдержкой времени, а в случае отклонения температуры выше зоны допустимых отклонений подключать вентилятор секции теплообменника с наибольшим показателем эффективности среди отключенных. Показатели эффективности работы принимается как отношения разности температур на входе и на выходе секций теплообменников к измеренной мощности электродвигателей. Данному способу присущие недостатки способа управления АВО газа дискретными переключениями, а именно частые пуски электродвигателей.

Схема управления электроприводами АВО газа к способу [21] представлена на рисунке 1.11.

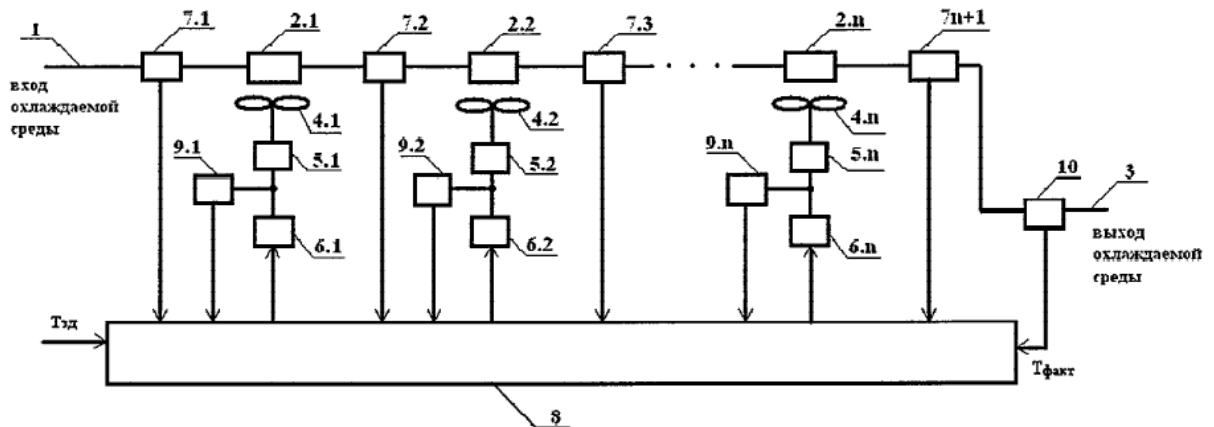


Рисунок 1.11 – Схема управления электроприводами АВО газа к способу [21] 1 – входной коллектор, 2.1..2.n – секции охлаждения, 3 – выходной коллектор, 4.1..4.n – вентиляторы, 5.1..5.n – приводные электродвигатели, 6.1..6.n – коммутирующие устройства, 7.1..7.n+1 – датчики температуры газа на входе и выходе секции, 8 – блок обработки измерительной информации и автоматического управления, 9.1..9.n – датчики мощности потребляемой электродвигателями, вентиляторов, 10 – датчик температуры в выходном коллекторе.

В технических решениях [22, 23] предлагаются похожие по схемотехническому исполнению системы управления с ПИ-регулированием на основе ЧРП. В блоках расчета необходимой скорости вращения вентилятора производится расчёт на основе информации получаемой от датчиков измерения внешних воздействий: температуры и влажности воздуха, подачи и температуры газа. Структурные схемы систем автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа по техническим решениям [22, 23] представлены на рисунках 1.12 и 1.13 соответственно.

В данных предложениях не рассматриваются и не решаются проблемы аэродинамического характера, а также отсутствует комплексная оценка влияния влажности совместно с температурой охлаждающего воздуха на тепловую характеристику АВО газа.

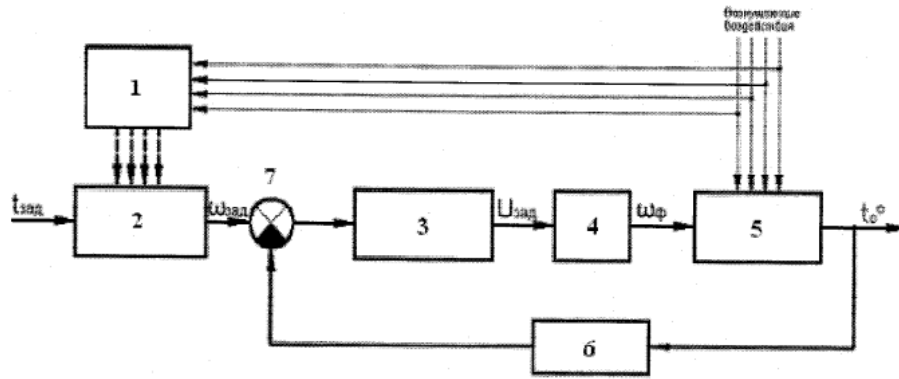


Рисунок 1.12 – Система автоматизированного управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа [22]

1 – датчики внешних воздействий (температуры газ и влажности окружающего воздуха, подачи и температуры газа), 2 – блок расчёта необходимой скорости вращения вентиляторов, 3 – ПИ-регулятор, 4 – электродвигатель, 5 – вентилятор, 6 – датчик температуры охлаждённого газа, 7 – сумматор.

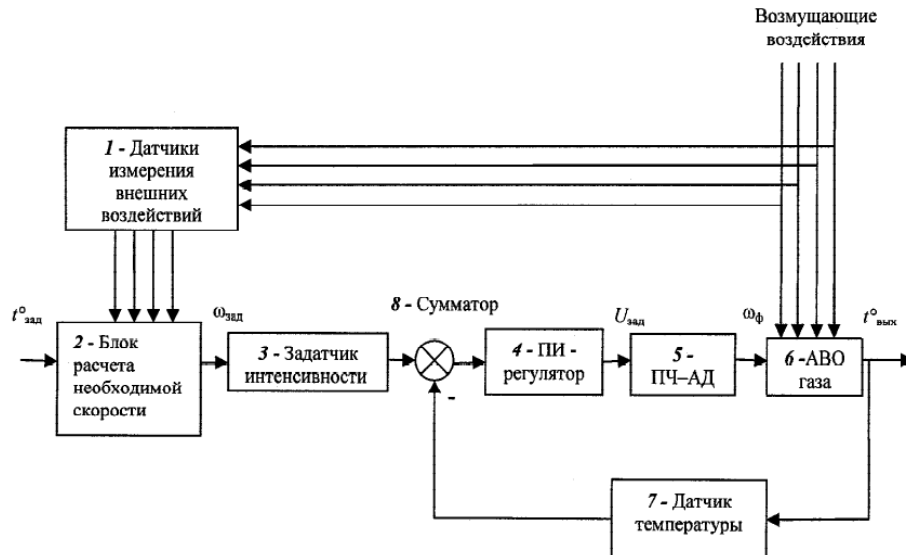


Рисунок 1.13 – Система управления аппаратами воздушного охлаждения [23]

В [24] описана система электроприводов АВО газа, в которой одна пара электроприводов вентиляторов управляется частотным электроприводом, а остальные с помощью коммутационных механизмов для поочередного запуска и торможения электроприводов вентиляторов и снабжены устройством плавного пуска. Система управления аппаратами воздушного охлаждения к патенту [24] представлена на рисунке 1.14.

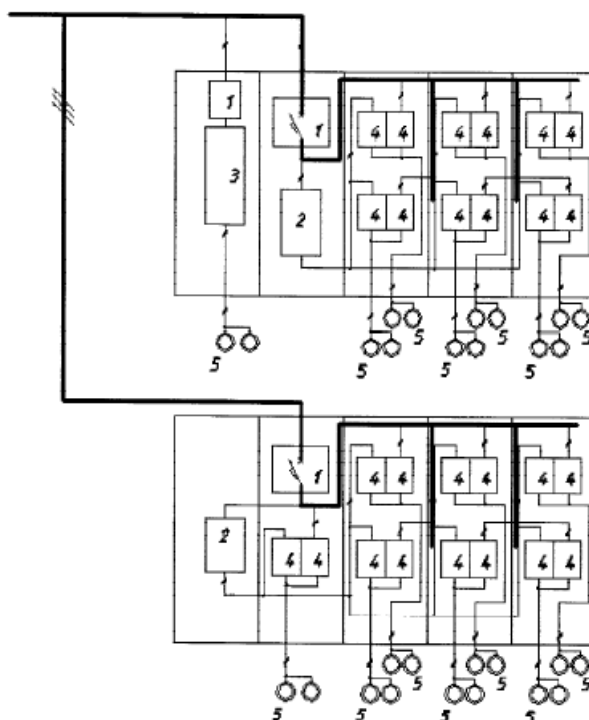


Рисунок 1.14 – Система управления аппаратами воздушного охлаждения [24]

Недостатком данного способа является то факт, что пуск плавным повышением напряжения для механизмов, имеющих большую инертность, таких как система «электродвигатель ВАСО – вентилятор АВО», может привести к выходу из строя электродвигателя при перегреве обмоток пусковыми токами. Пусковые режимы наружных механизмов при эксплуатации в условиях Крайнего можно отнести к тяжёлым, в связи с отложением льда на внешних частях, повышением вязкости смазки подшипников при низких температурах воздуха.

В целях минимизации негативных явлений при пуске электродвигателя в состоянии выбега, либо имеющего обратное вращение ротора возможно использование способов подхвата ротора. Для этого необходимо иметь значение скорости вращения ротора. В ряде патентов предлагаются способы измерения скорости вращения ротора электродвигателя.

Так в [25] описывается бесконтактный датчик скорости вращения и положения роторов электродвигателей различных типов, устанавливаемый непосредственно на ротор, а в патенте [26] скорость вращения погружных

асинхронных двигателей измеряют с помощью размещённых на валу на диэлектрических шайбах немагнитных промежуточных подшипников ротора с диаметрально расположенными магнитами. Недостатком данных способов является то, что установка датчика скорости снижает надёжность электропривода.

В патенте [27] приводится описание бездатчикового способа определения вращения барабана с приводом от трёхфазного асинхронного электродвигателя. Способ заключается в подключении фазных обмоток статора трёхфазного асинхронного электродвигателя к источнику постоянного тока, и подаче постоянного тока в течение заданного интервала времени для намагничивания ротора трёхфазного асинхронного электродвигателя. После отключения обмоток от источника постоянного тока определяется временной характер токов в ответ на намагничивание ротора. На основании временного характера индуцированных токов определяется наличие или отсутствие вращения ротора.

В патенте [28] описан способ подхвата преобразователя частоты, питающего асинхронный электродвигатель, в котором при отключении или глубоком снижении напряжения в питающей сети снимаются управляющие сигналы преобразователя и напряжение на выходе преобразователя частоты снижается до нуля, а после восстановления (повышения) напряжения в питающей сети выше установленного уровня, измеряется частота ЭДС статора электродвигателя, подаются управляющие сигналы на преобразователь частоты и производится установка напряжения на выходе преобразователя с частотой, равной частоте ЭДС статора. Схема, реализующая указанный способ подхвата преобразователя частоты представлена на рисунке 1.15.

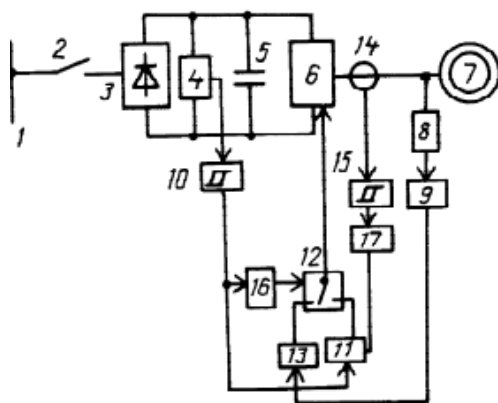


Рисунок 1.15 – Схема, реализующая способ подхвата преобразователя частоты

На рисунке изображены: 1 – шины питающей электрической сети, 2 – выключатель, 3 – выпрямитель, 4 – датчик напряжения, 5 – конденсатор, 6 – инвертор напряжения, 7 – электродвигатель, 8 – датчики напряжения, установленные в трёх фазах, 9 – блок определения частоты, 10 – первый пороговый элемент, 11 – формирователь, 12 – блок управления инвертором, 13 – переключатель, 14 – датчики тока, установленные в трёх фазах, 15 – пороговый элемент, 16 – первый блок задержки на появление сигнала, 17 – второй блок задержки на появление сигнала

Недостатком указанного технического решения является отсутствие функциональной возможности выполнять подхват преобразователя частоты при обратном вращении ротора электродвигателя, т.к. в данном способе отсутствует функция определения направления вращения ротора электродвигателя.

Выводы по главе 1

1. В существующих условиях добычи газа на месторождениях Крайнего Севера высокую актуальность имеет технологическая задача по минимизации риска ЛГО. В ряде работ предлагается ЧРП в качестве способа борьбы с ЛГО с помощью реверсирования электродвигателя. Однако в представленных работах не рассматривается влияние рециркуляционных потоков воздуха на пусковые свойства и энергетические показатели электропривода АВО газа, что может ограничить применение данного способа. При реверсировании электродвигателей и направления потока воздуха возникают проблемы с нагревом грунтов многолетней мерзлоты, происходит захват атмосферных осадков в диффузоры вентиляторов.

2. Аэродинамическое взаимовлияние вентиляторов и «ветровые» поля являются существенными факторами, определяющими ресурс работы электродвигателей. При пуске электродвигателя в условиях авторотации вентилятора возникает режим противовключения электродвигателя, приводящий к негативным электромеханическим и тепловым последствиям для электродвигателя.

3. Для снижения энергозатрат и увеличения ресурса электродвигателя актуальной является разработка энергетически эффективного способа пуска электропривода вентилятора АВО газа в режиме авторотации с использованием современных преобразовательных устройств.

4. Анализ существующих способов управления АВО газа для регулирования температуры газа показал, что в данных способах управления электроприводом не учитываются свойства и особенности двухступенчатых секций АВО газа, несмотря на распространённость таких технологических схем в добычных комплексах. 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.

В связи с вышеизложенным в диссертации ставятся и решаются следующие задачи:

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.

Глава 2 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ЭНЕРГО-РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ АВО ГАЗА В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

2.1 Динамика электропривода АВО газа при авторотации вентилятора

При подаче напряжения сети на клеммы электродвигателя вентилятора в режиме авторотации происходит торможение противовключением с последующим прямым пуском. Режим противовключения называется режим, при котором ротор двигателя вращается под действием подводимой извне энергии против направления вращения магнитного поля [11]. Это режим больших скольжений, т.к. в этом случае скольжение больше единицы [13, 29]. В основном режим противовключения рассматривается как тормозной и исследуется обычно с точки зрения показателей эффективности торможения [30, 31]. В данной работе данный режим рассматривается как этап пуска электропривода, а его анализ представляет интерес с точки зрения дополнительного нагрева двигателя и увеличения времени протекания пусковых токов

Асинхронный двигатель (АД) в режиме противовключения потребляет из сети активную мощность и развивает положительный вращающий момент, действующий в сторону вращения поля, но в обратном по отношению к вращению ротора [13]. В режиме противовключения двигатель потребляет также механическую мощность с вала или ротора, поскольку внешний вращающий момент действует в сторону вращения ротора. Мощность, потребляемая из сети и мощность, потребляемая с вала, расходуется на потери в двигателе и данный режим является тяжёлым для электродвигателя с точки зрения теплового износа изоляции [31, 32].

Токи статора и ротора определяются по выражению, полученному из Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя [30]:

$$I_1 = I_0 + I_2' = I_0 + \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.1)$$

где I_1 – ток фазы обмотки статора;

I_0 – ток ветви намагничивания (ток холостого хода);

$U_{1\phi}$ – напряжение фазы обмотки статора;

I_2' – приведенный ток ротора;

R_1, X_1 – соответственно активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки статора;

R_2', X_2' – соответственно приведенное активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки ротора;

S – скольжение.

В режиме противовключения скольжение больше 1 ($S > 1$). При этом значение R_2'/S становится меньше, чем при пуске из неподвижного состояния, когда $S=1$. В результате, как следует из (2.1), увеличиваются токи ротора и статора, по отношению к пуску из неподвижного состояния, как следствие, повышаются потери мощности в электродвигателе, повышается нагрев обмоток электродвигателя и увеличивается время воздействия повышенных динамических усилий на обмотки статора и ротора [11].

В результате повышается вероятность отказа электродвигателя, так как в большинстве случаев (83 – 94%) отказы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором происходят из-за повреждений изоляции статорной обмотки вследствие её перегрева [32 – 39].

При пуске вентилятора в режиме авторотации основное уравнение движения электропривода необходимо дополнить моментом, который создаётся рециркулирующим потоком воздуха, и учесть, что сначала происходит торможение электропривода (снижение скорости вращения до нуля), а затем пуск [40 – 43].

Осевой вентилятор АВО газа является центробежным механизмом. Механические характеристики центробежных механизмов в относительных единицах принято представлять выражением [11, 44 – 50]:

$$M_c = M_{CO.} + (M_H - M_{CO.}) \cdot v^\gamma, \quad (2.2)$$

где M_c – момент сопротивления;

$M_{CO.}$ – начальный момент сопротивления при $\omega = 0$;

M_H – момент нагрузки двигателя при номинальной угловой скорости;

$v = \omega/\omega_{НОМ}$ – относительная частота вращения вентилятора; ω – угловая скорость;

$\omega_{НОМ}$ – номинальная скорость вращения двигателя;

γ – показатель степени.

Значение показателя γ в выражении (2.2) зависит от физических процессов, приводящих к режиму противодействия [11]. В режимах без противодействия $\gamma=2$ [44]. В режимах с противодействием для механической характеристики центробежных механизмов нет общепринятого аналитического выражения. В [47] отмечается, что в режимах с противодействием показатель степени может принимать значения 4.5 и более. В [46] механическая характеристика центробежного механизма в рабочем диапазоне аппроксимируется линейной зависимостью. В [47] и [48] для центробежного насоса с последовательно установленным обратным клапаном получены выражения для γ в функции величины противодействия и подачи насоса. Однако ни одно из известных уравнений не подходит для пуска вентилятора АВО в условиях противодействия от рециркуляционных потоков воздуха. Объясняется это тем, что во всех известных уравнениях режим противодействия рассматривается при скольжении от нуля до единицы. В то время как при пуске вентилятора АВО газа противодействие происходит при скольжении больше единицы [11, 40, 41, 42, 51].

Для учета того, чтобы учесть авторотацию вентилятора при пуске электродвигателя АВО газа предлагается два способа. В первом по аналогии с [46, 47] можно найти зависимость показателя степени γ от потока рециркулируемого воздуха. Это требует дополнительных аэродинамических расчётов и экспериментальных исследований. Во втором способе возможно предположить, что показатель степени γ (2.2) является постоянным и равным $\gamma=2$, а изменяется момент сопротивления M_{CO} . В этом способе предполагается, что при авторотации вентилятора момент сопротивления и скорость его вращения связаны квадратичным законом независимо от направления вращения.

Назовем момент, созданный на валу электродвигателя рециркуляционным потоком воздуха, моментом сопротивления обратного вращения M_{OBR} . Тогда уравнения моментов при пуске вентилятора в условиях противодействия на лопасти вентилятора от рециркуляционного потока воздуха можно представить в следующем виде [11]:

$$M_{CO} = M_{CT} + M_{OBR}. \quad (2.3)$$

где M_{CT} – момент сопротивления, обусловленный силами трения, и равный начальному моменту сопротивления при пуске из состояния покоя.

Разгон электропривода происходит под действием динамического момента [43, 52 – 58]

$$M_d(\omega) = M(\omega) - M_c(\omega). \quad (2.4)$$

где $M_d(\omega)$ – момент развиваемый двигателем.

Для определения момента, развиваемого электродвигателем, применим уточнённую формулу Клосса [52 – 58]:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + s_k \cdot a)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2 \cdot s_k \cdot a} \quad (2.5)$$

где M_k – критический момент;

s_k – критическое скольжение;

a – отношение активных сопротивлений статора и ротора.

Время пуска вычисляется интегрированием уравнения моментов

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{ЭД}}(\omega) - M_{\text{С.}}(\omega) \quad (2.6)$$

$$t_{\text{п.}} = \int_{-\omega_{\text{т.}}}^{\omega_{\text{НОМ.}}} \frac{J \cdot d\omega}{M_{\text{ЭД}}(\omega) - M_{\text{С.}}(\omega)} \quad (2.7)$$

Параметры схемы замещения представляются в зависимости от скольжения поэтому подставив $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$ получим

$$t_{\text{п.}} = \int_{s_{\text{т.}}}^{s_{\text{НОМ.}}} \frac{-J \cdot \omega_0 \cdot ds}{M_{\text{ЭД}}(s) - M_{\text{С.}}(s)} \quad (2.8)$$

$$t_{\text{п.}} = \int_{s_{\text{т.}}}^{s_{\text{НОМ.}}} \frac{-J \cdot \omega_0 \cdot ds}{\frac{U_{1\text{ф.}}^2 \cdot R_2' / s}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} - [M_{\text{С.0}} + (M_{\text{С.НОМ.}} - M_{\text{С.0}}) \cdot (1-s)^2]} \quad (2.9)$$

$$t_{\text{п.}} = \int_{s_{\text{т.}}}^{s_{\text{НОМ.}}} \frac{-J \cdot s \cdot \omega_0^2 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right] ds}{U_{1\text{ф.}}^2 \cdot R_2' - \omega_0 \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right] \cdot [M_{\text{С.0}} + (M_{\text{С.НОМ.}} - M_{\text{С.0}}) \cdot (1-s)^2]} \quad (2.10)$$

Рассмотрим пуск в режиме противовключения электродвигателя ВАСО14-16-24У1 привода АВО газа типа 2АВГ-75 со стеклопластиковым композитным рабочим колесом типа ГАЦ-50-4МЗ. Паспортные данные электродвигателя: номинальная мощность $P_{\text{НОМ.}}=37$ кВт; частота вращения магнитного поля $n_0=250$ мин⁻¹; номинальное напряжение $U_{\text{НОМ.}}=380$ В; номинальный ток $I_{\text{НОМ.}}=99,5$ А; номинальное скольжение $s_{\text{НОМ.}}=0,017$; коэффициент мощности $\cos\varphi=0,64$; коэффициент полезного действия $\text{КПД}=88,2\%$; перегрузочная способность $\lambda=M_{\text{макс.}}/M_{\text{НОМ.}}=2,34$. Массивность и специфичная геометрия (отношение диаметра ротора к длине бочки 3:1) придают существенную инерционность ротору, и как следствие, создают тяжёлые условия для двигателя в режиме противовключения.

Для принятого двигателя ($M_{\text{к.}} = 3403,16$; $s_{\text{к.}}=0,0817$; $a=1,43$) уточнённая формула Клосса (5) принимает вид

$$M = \frac{7601,5}{\frac{0,0817}{s} + \frac{s}{0,0817} + 0,2336}$$

По выражениям (2.2) – (2.5) построены представленные на рисунке 2.1: механические характеристики двигателя (кривая $M_{дв.}$), вентилятора (кривая $M_{с.}$), и совмещённая характеристика электропривода (кривая $M_{дин.}$).

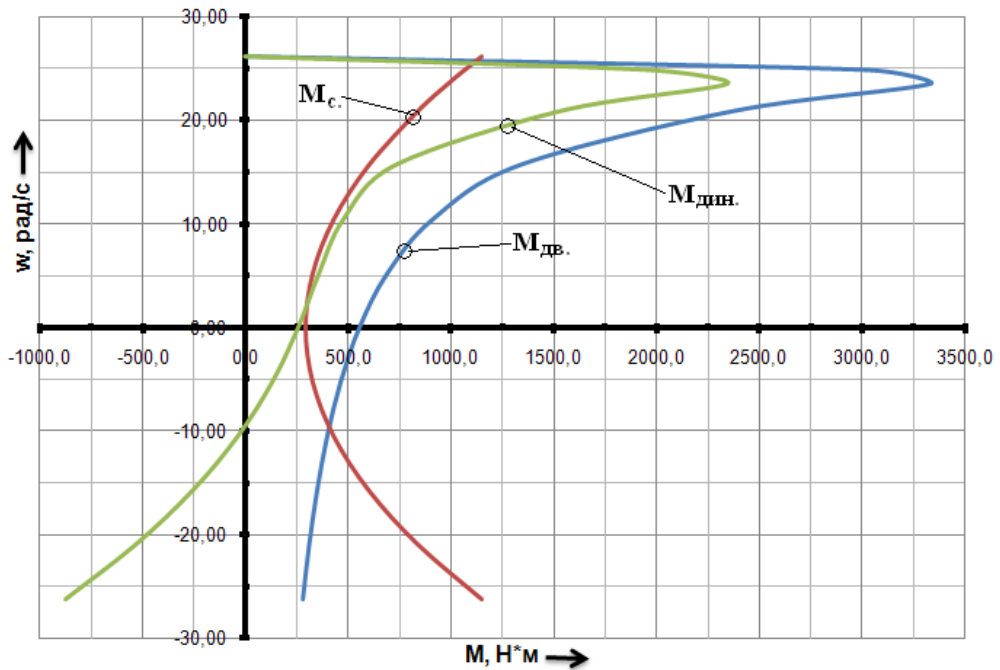


Рисунок 2.1 – Механические характеристики

Для принятого способа определения степени в уравнении моментов и кривая момента сопротивления вентилятора симметрична относительно оси абсцисс. Как видно из рисунка 2.1 при увеличении скоростей авторотации момент, развиваемый электродвигателем, снижается, а момент сопротивления вентилятора увеличивается. При этом динамический момент электропривода в точке пересечения кривых момента сопротивления вентилятора и момента электродвигателя равен нулю. Назовем это значение скорости авторотации критическим. При скорости авторотации более критического значения динамический момент становится отрицательным. Пуск электродвигателя в этом случае приведет к длительному протеканию пускового тока, перегреву обмотки и отключению защитами или при несрабатывании защит к отказу. В [59] описана проблема и сделаны выводы о влиянии рециркулирующих потоков воздуха на отключение

электродвигателей АВО газа при экспериментальных исследованиях частотно-регулируемого электропривода.

Пуск электродвигателя при скорости авторотации ниже критического значения происходит поэтапно. Сначала происходит торможение, скорость рабочего колеса снижается от начальной скорости авторотации до нулевой. Далее происходит разгон двигателя до номинальной скорости вращения.

Для анализа процесса пуска и расчета длительности переходных процессов электропривода используем графоаналитический метод площадей, заключающийся в графическом интегрировании уравнения движения.

Кривая разгона двигателя при включении двигателя при обратной скорости вращения, равной критическому значению, представлена на рисунке 2.2.

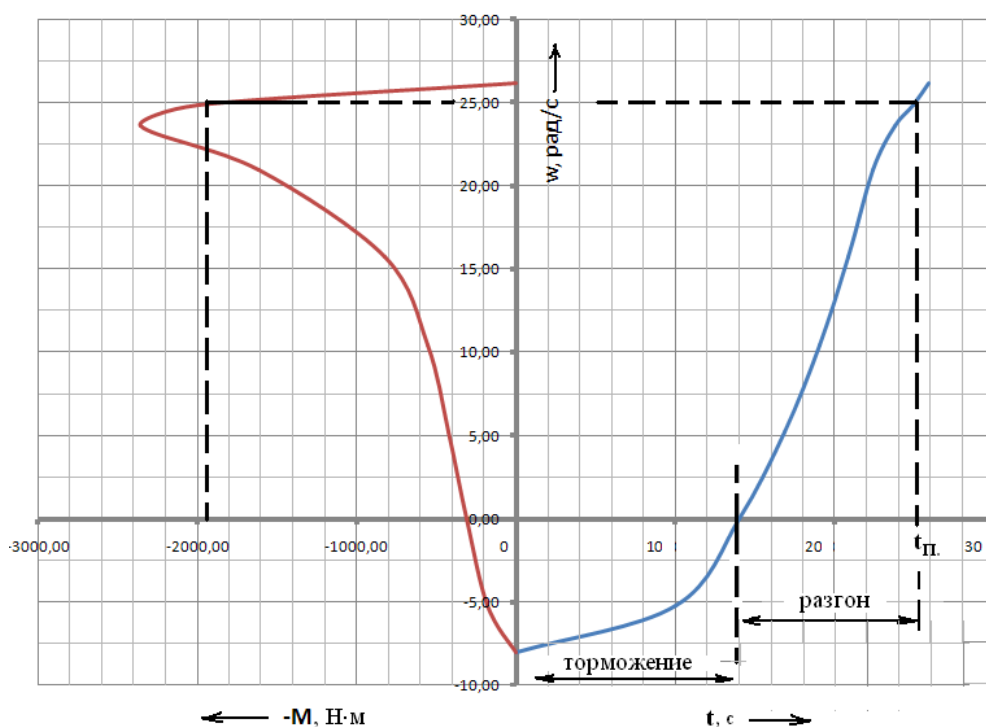


Рисунок 2.2 – График динамического момента и кривая разгона

Как видно из рисунка 2.2, время торможения при включении двигателя при критическом значении обратной скорости вращения равно 14 с, время разгона от нулевой скорости до установившегося значения равно 11,5 с, а полное время пуска составит 24,5 с. При этом по сравнению с пуском из

состояния покоя (11,5 с.) время пуска увеличивается более чем в два раза [11].

При снижении скорости обратного вращения в момент включения электродвигателя время пуска снижается (рисунок 2.3).

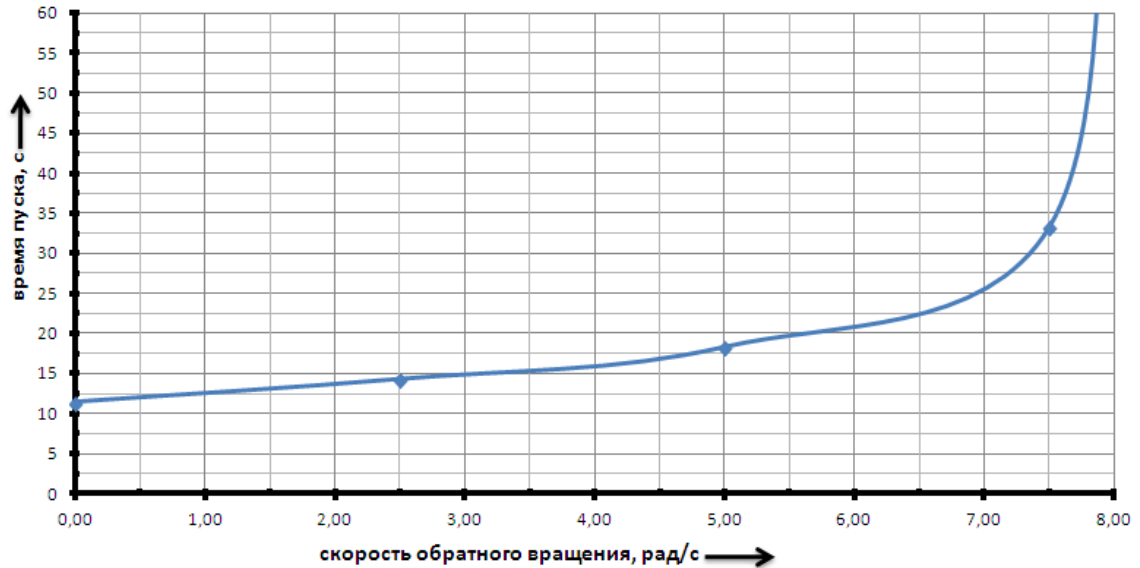


Рисунок 2.3 - Зависимость времени пуска от скорости авторотации

Полученные зависимости времени пуска от скорости авторотации и методику проведенного расчёта полезны для анализа пуска электродвигателя АВО газа в режиме авторотации.

2.1.1 Потери мощности в электродвигателе

Потери мощности в АД состоят из потерь в обмотке статора $\Delta P_{эл.1}$, потерь в стали $\Delta P_{ст.}$, потерь в обмотке ротора $\Delta P_{эл.2}$, механических потерь $\Delta P_{мех.}$ и добавочных потерь $\Delta P_{доб.}$ [52, 60].

$$P_{ном.} = \Delta P_{эл.1} + \Delta P_{ст.} + \Delta P_{эл.2} + \Delta P_{мех.} + \Delta P_{доб.} \quad (2.11)$$

Также номинальные потери мощности в АД вычисляются по каталожным данным, а именно по КПД:

$$\Delta P_{ном.} = \frac{P_{ном.} \cdot (1 - \eta_{ном.})}{\eta_{ном.}} \quad (2.12)$$

$$\Delta P_{ном.} = \frac{37000 \cdot (1 - 0,882)}{0,882} = 4590,1 \text{ Вт.}$$

Расчёт потерь в электродвигателе ВАСО16-14-24 в номинальном режиме произведенный по методике, предложенной в [52] представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Расчёт потерь мощности в электродвигателе
в номинальном режиме

Наименование потерь	Формула	Знач., Вт	Доля в сумме расчетны х потерь, %
Потери в обмотке статора, $\Delta P_{эл.1 \text{ ном.}}$	$3 \cdot I_{1 \text{ ном.}}^2 \cdot R_1 =$ $= 3 \cdot \frac{P_{\text{ном.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном.}} \cdot \eta_{\text{ном.}}} \cdot R_1$	3183,7	64,3
Потери в обмотке ротора, $\Delta P_{эл.2 \text{ ном.}}$	$3 \cdot I_{2 \text{ ном.}}'^2 \cdot R_2' =$ $3 \cdot \left(\frac{U_{1 \text{ ф.}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \right)^2 \cdot R_2'$	593,8	12,0
Потери в стали, $\Delta P_{ст \text{ ном.}}$	$0,2 \cdot \Delta P_{\text{ном}}$	990,0	18,2
Механические потери, $\Delta P_{мех. \text{ ном.}}$	$0,05 \cdot \Delta P_{\text{ном.}}$	247,5	5,0
Добавочные потери, $\Delta P_{доб. \text{ ном.}}$	$0,005 \cdot \Delta P_{\text{ном.}}$	24,8	0,5
Сумма расчетных потерь $\Delta P_{\text{ном.}}$	$\Delta P_{эл.1} + \Delta P_{ст.} + \Delta P_{эл.2} + \Delta P_{мех.} + \Delta P_{доб.}$	4950,1	100,0
Потери по каталожному КПД, $\Delta P_{\text{ном.}}$	$\frac{P_{\text{ном.}} \cdot (1 - \eta_{\text{ном.}})}{\eta_{\text{ном.}}}$	4950,1	100,0

где $P_{\text{ном.}}$ – номинальная мощность АД, Вт; $U_{\text{ном.}}$ – номинальное напряжение АД, В; $\eta_{\text{ном.}}$ – номинальный КПД АД; $I_{1 \text{ ном.}}$ – номинальный ток обмотки статора, А; R_1 – активное сопротивление фазы статора, Ом; $I_{2 \text{ ном.}}'$ – номинальный приведённый ток обмотки ротора, А; R_2' – приведённое активное сопротивление фазы ротора, Ом; $U_{1 \text{ ф.}}$ – номинальное фазное напряжение сети, В; X_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы

обмотки статора, Ом; X'_2 – приведённое индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора, Ом.

В расчёте приняты следующие допущения:

Номинальные механические потери мощности (механические потери мощности при номинальной скорости вращения двигателя) [52]:

$$\Delta P_{\text{мех.ном.}} = (0,05 - 0,15) \cdot \Delta P_{\text{ном.}} \quad (2.13)$$

Для электродвигателя ВАСО16-14-24 принимаем

$$\Delta P_{\text{мех.ном.}} = 0,05 \cdot \Delta P_{\text{ном.}} \quad (2.14)$$

Номинальные потери в стали (потери в стали статора в номинальном режиме) АД [52, 60, 61]:

$$\Delta P_{\text{ст. ном.}} \approx 0,2 \cdot \Delta P_{\text{ном.}} \quad (2.15)$$

Учитывая специфичность конструкции электродвигателя ВАСО16-14-24 (двигатель имеет $p = 12$, синхронную угловую скорость 250 мин⁻¹) целесообразно потери в стали принять [62]:

$$\Delta P_{\text{ст. ном.}} = 0,182 \cdot \Delta P_{\text{ном.}} \quad (2.16)$$

Номинальные добавочные потери (добавочные потери двигателя при работе в номинальном режиме) АД принимаются 0,5% подводимой мощности [52]:

$$\Delta P_{\text{доб. ном.}} = 0,005 \cdot \Delta P_{\text{ном.}} \quad (2.17)$$

В режимах, отличных от номинального, потери в обмотке статора и добавочные потери пропорциональны квадрату тока статора, потери в обмотке ротора пропорциональны квадрату тока ротора, а механические потери пропорциональны квадрату угловой скорости [13]. При нерегулируемом электроприводе при постоянных значениях частоты и напряжения питания потери в стали в процессе пуска не изменяются. В переходных режимах (разгон электродвигателя) механические потери принимают пропорциональными квадрату скорости [52, 60, 61]:

$$\Delta P_{\text{мех.}} = \Delta P_{\text{мех.ном.}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном.}}} \right)^2 \quad (2.18)$$

Потери в стали в переходных (разгон) и установившихся режимах при работе двигателя под номинальным напряжением будут равны номинальным.

Добавочные потери в переходных режимах принимают пропорциональными квадрату тока [52, 60, 61, 63, 64, 65]:

$$\Delta P_{доб.} = \Delta P_{доб.ном.} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1ном.}} \right)^2 \quad (2.19)$$

Потери в обмотке статора и ротора пропорциональны квадратам их токов [52, 60, 61, 63, 64, 65]:

$$\Delta P_{эл.1} = \Delta P_{эл.1ном.} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1ном.}} \right)^2 \quad (2.20)$$

$$\Delta P_{эл.2} = \Delta P_{эл.2ном.} \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2ном.}} \right)^2 \quad (2.21)$$

Для нерегулируемого электропривода суммарные потери мощности в определяются по формуле (без учёта потерь от высших гармоник):

$$\Delta P = \Delta P_{эл.1ном.} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1ном.}} \right)^2 + \Delta P_{ст.ном.} + \Delta P_{эл.2ном.} \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2ном.}} \right)^2 + \Delta P_{мех.ном.} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном.}} \right)^2 + \Delta P_{доб.ном.} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1ном.}} \right)^2 \quad (2.22)$$

где $I_1, I_{1ном.}$ – текущее и номинальное значения тока статора;

$I_2, I_{2ном.}$ – текущее и номинальное значения тока ротора;

$\omega, \omega_{ном.}$ – текущее и номинальное значения угловой скорости;

$U_1, U_{1ном.}$ – текущее и номинальное значения напряжения статора,

$f_1, f_{1ном.}$ – текущее и номинальное значения частоты питающего напряжения.

Потери в обмотках статора и ротора при частотном регулировании пропорциональны квадратам их токов, добавочные потери принимаются пропорциональными квадрату тока статора, механические потери принимаются пропорциональными квадрату скорости. Потери в стали не остаются постоянными, а изменяются по сложному закону в функции

частоты и напряжения. При частотном регулировании скорости вращения АД потери в стали определяются выражением [52]:

$$\Delta P_{\text{ст.}} = \Delta P_{\text{ст.ном.}} \cdot \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{ном.}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{ном.}}} \right)^q \quad (2.23)$$

где Φ – текущее значение магнитного потока двигателя, Вб;

$\Phi_{\text{ном.}}$ – номинальное значение магнитного потока двигателя, Вб;

f_1 – текущее значение частоты питающего напряжения, Гц;

$f_{1\text{ном.}}$ – номинальное значение частоты питающего напряжения, Гц;

q – показатель степени, зависящий от сорта электротехнической стали и находящийся в пределах 1,3 – 1,5.

Приближенно можно принять, что потери в стали, при частотном регулировании пропорциональными квадрату напряжения и частоте питающего напряжения в степени 1,5 [52, 60, 61, 63].

Тогда для электродвигателя ВАСО16-14-24 $q = 1,5$.

В электродвигателе активное сопротивление обмотки статора существенно меньше индуктивного. Пренебрегая активным сопротивлением, можно записать [52, 60, 61, 63]:

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\text{ном.}}} = \frac{U_1}{U_{1\text{ном.}}} \quad (2.24)$$

Тогда потери в стали при частотном регулировании пропорциональны квадрату напряжения и частоте в степени 1,5:

$$\Delta P_{\text{ст.}} = \Delta P_{\text{ст.ном.}} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1\text{ном.}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{ном.}}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.25)$$

Для регулируемого электропривода суммарные потери электроэнергии определяются по формуле (без учёта потерь от высших гармоник):

$$\begin{aligned} \Delta P = & \Delta P_{\text{эл.1 ном.}} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1\text{ном.}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{ст.ном.}} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1\text{ном.}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{ном.}}} \right)^{\frac{3}{2}} + \\ & + \Delta P_{\text{эл.2 ном.}} \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2\text{ном.}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{мех.ном.}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном.}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{доб.ном.}} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1\text{ном.}}} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.26)$$

2.1.2 Нагрев асинхронного двигателя при пуске электропривода в режиме авторотации вентилятора

Как было сказано выше, одним из самых негативных последствий режима противовключения является нагрев электродвигателя в затяжном пуске, сопровождающийся тепловым износом изоляции. Для оценки степени влияния данного фактора необходимо произвести расчёт температуры электродвигателя и сравнить с допустимой температурой класса изоляции. В силу низкой теплоёмкости меди обмотки статора по отношению к теплоёмкости стали статора, обмотка статора при пуске подвержена большему нагреву и росту температуры.

Вследствие сложности описания тепловых процессов в электродвигателе при анализе в данной работе принимаются общие допущения, что магнитопровод статора электрической машины рассматривается как однородное сплошное тело, источники тепла равномерно распределены по объёму электродвигателя, окружающая среда обладает бесконечно большой теплоемкостью [34, 36, 66 – 80].

Количество теплоты, выделяемое в процессе пуска в обмотке статора

$$Q_{эл.1} = \Delta P_{эл.1} \cdot t_{п.} \quad (2.27)$$

где $t_{п.}$ – время пуска электродвигателя, с.

На основании указанных допущений уравнение теплового баланса для обмотки статора будет выглядеть

$$\Delta P_{эл.1} \cdot t_{п.} = c_{м.} \cdot m_{м.} \cdot \Delta T_{м} \quad (2.28)$$

где $c_{м.}$ – удельная теплоёмкость меди, Дж/(кг·К);

$m_{м.}$ – масса меди статора, кг

Из (2.28) изменение температуры меди обмотки статора равно

$$\Delta T_{м} = (\Delta P_{эл.1} \cdot t_{п.}) / (c_{м.} \cdot m_{м.}) \quad (2.29)$$

Для оценки сравнением изменения температуры меди с допустимым превышением температуры по классу изоляции в данном анализе начальная

температура принимается равной 40°C. Для класса изоляции F анализируемого электродвигателя: $\Delta T_{\text{доп.}}=155^\circ\text{C}$.

2.2 Пуск электропривода АВО в режиме авторотации вентилятора

2.2.1 Способы торможения электропривода в режиме авторотации вентилятора

Существуют различные варианты управляемого электрического торможения АД с КЗР с остановкой ротора до нулевой скорости [31, 46, 47, 52, 60, 81, 82, 83]:

- противовключением;
- динамическое (ДТ);
- плавное, снижением напряжения;
- частотное.

Торможение противовключением осуществляется непосредственным подключением к сети с номинальными параметрами ($U_{\text{с.}}$, $f_{\text{с.}}$).

Динамическое торможение реализуется подключением постороннего источника выпрямленного или постоянного тока (ИПТ на рисунке 2.4). Способ ДТ основан на взаимодействии статического магнитного поля статора, создаваемого постоянным током с вращающимся магнитным полем ротора, создаваемым током в обмотках ротора в результате возбуждения от поля статора. При этом по принципу Ленца будет создавать электромагнитный момент, направленный против направления вращения двигателя, т.е. будет являться тормозным. В качестве источника постоянного тока для систем динамического торможения применяются полупроводниковые выпрямители. Помимо известных схем с неуправляемыми выпрямителями (однополупериодный, двухполупериодный, трёхфазный с нулевой точкой и трёхфазный мостовой), могут применяться управляемые выпрямители [82, 83].

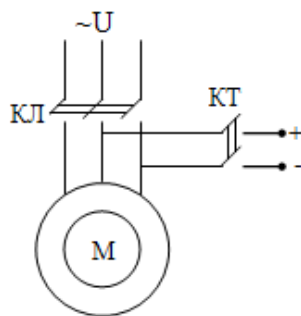


Рисунок 2.4 – Схемы ДТ подключением источника постоянного тока

Эти схемы отличаются величиной и содержанием высших гармоник. Гармонические составляющие тока оказывают значительное влияние на моменты при динамическом торможении. Вид статической характеристики искажается [82, 83]. Наилучшие показатели качества выпрямляемого напряжения по гармоническому составу имеет трёхфазная мостовая схема.

Плавное торможение реализуется использованием УПП (тиристорных пускателей). Данный способ основан на плавном снижении напряжения, относительно начального значения. На рисунке 2.5 приведена схема наиболее широко распространённого УПП на основе тиристорного пускателя со встречно-параллельно подключенными тиристорами [64, 65, 84, 85, 86].

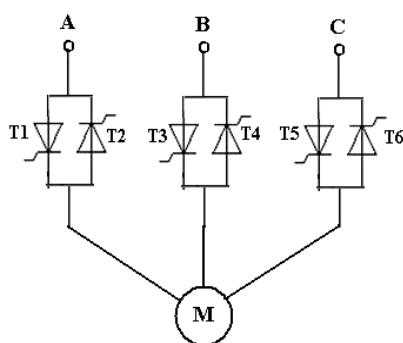


Рисунок 2.5 – Тиристорный пускатель (УПП) выполненный по встречно-параллельной схеме

Принцип частотного торможения основан на подаче на обмотки электродвигателя напряжения и частоты по определённому закону с использованием преобразователя частоты.

ПЧ может быть, как непосредственным, так и выполнен по схеме с промежуточным звеном постоянного тока (рисунок 2.6).

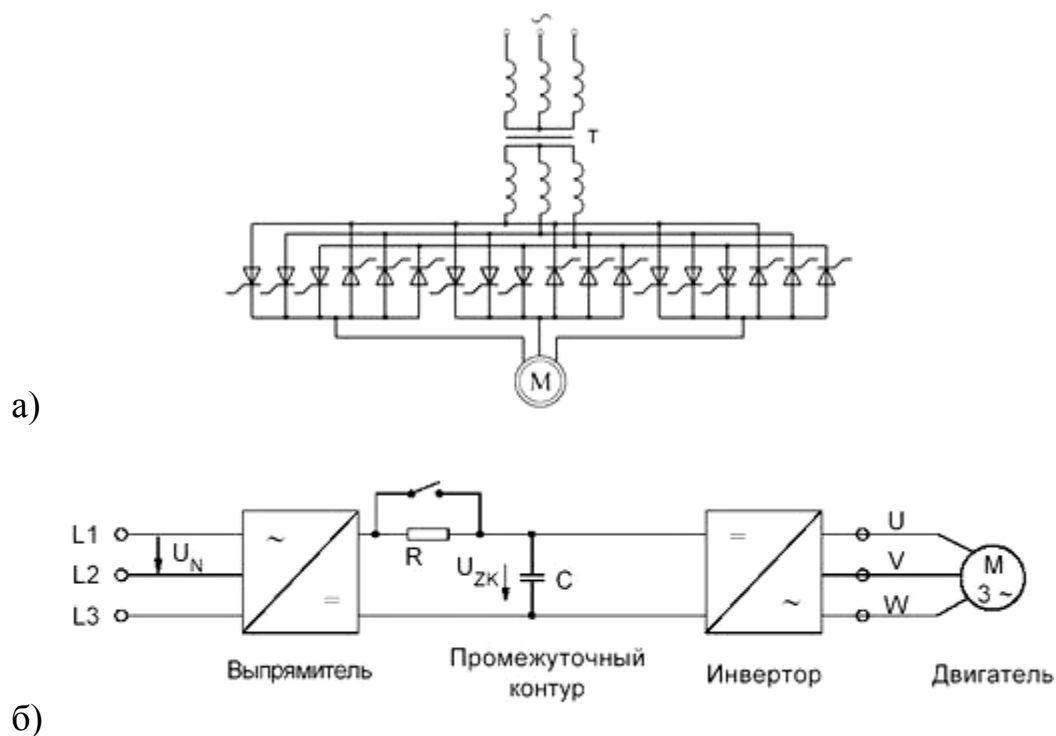


Рисунок 2.6 – Типовая схема ПЧ: а) непосредственного; б) с промежуточным звеном постоянного тока

2.2.2 Способы пуска электропривода

В настоящее время существуют следующие способы пуска [11, 41, 42, 46, 47, 51, 52, 57, 58, 86]:

- прямой;
- плавный, повышением напряжения;
- частотный.

Прямой пуск осуществляется непосредственным подключением обмотки статора к сети. В данном случае пуск происходит с протеканием номинального пускового тока (при номинальных параметрах сети);

Плавный пуск реализуется применением устройства плавного пуска (УПП), тиристорного пускателя. Данный способ преследует цель ограничения пускового тока регулированием (плавным повышением)

напряжения, подводимого к статору. Плавный пуск реализуется увеличением напряжения, подводимого к статору до номинального значения в течение пуска двигателя. Плавность характеризуется математическим описанием напряжения. В настоящее время наиболее используемыми являются линейная и экспоненциальная формы напряжения при плавном пуске. Недостатком способа является зависимость момента на валу ЭД от подводимого к статору напряжения, для АД квадратичная, что налагает серьёзные ограничения на использование данного способа вследствие наличия момента сопротивления рециркулирующего потока воздуха.

В частотном пуске частота питаемого напряжения в первоначальный момент времени равна или близка нулю, далее повышается плавно в зависимости от предъявляемых требований к разгонной характеристике применением преобразователя частоты.

2.2.3 Разработка комбинированных способов пуска электропривода вентилятора в режиме авторотации

При авторотации вентилятора пуск электропривода происходит в два этапа: торможение колеса и разгон в штатном направлении. Поэтапный пуск принято называть комбинированным или также компаундным.

Варианты комбинированного пуска основаны на выборе способов торможения вентилятора в режиме авторотации и последующего пуска представлены на рисунке 2.7.

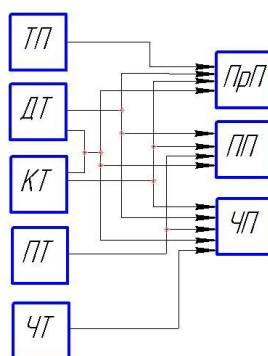


Рисунок 2.7 – Блок-схема вариантов комбинированного пуска

Для минимизации негативного влияния противодействия от рециркуляционных потоков воздуха и исключения режима противовключения в режиме авторотации вентилятора предлагается использование комбинированных (компаундных) способов пуска:

- 1) динамическое торможение – прямой пуск;
- 2) динамическое торможение – плавный пуск;
- 3) динамическое торможение – частотный пуск;
- 4) частотный останов – частотный пуск.

Таблица 2.2 –

Описание способов комбинированного пуска

Способ	Математическое описание	Примечание
Торможение противовключением – прямой пуск	$U(t) = \begin{cases} U_{c.}, & t \in (0; t_{ТП}] \\ U_{c.}, & t \in (t_{ТП}; t_{П}] \end{cases}$ $f(t) = \begin{cases} f_{c.}, & t \in (0; t_{ТП}] \\ f_{c.}, & t \in (t_{ТП}; t_{П}] \end{cases}$	$t_{ТП}$ – время торможения противовключением; $t_{П}$ – время пуска
Динамическое торможение – прямой пуск	$U(t) = \begin{cases} U_{ДТ}, & t \in (0; t_{ДТ}] \\ U_{c.}, & t \in (t_{ДТ}; t_{П}] \end{cases}$ $f(t) = \begin{cases} 0, & t \in (0; t_{ДТ}] \\ f_{c.}, & t \in (t_{ДТ}; t_{П}] \end{cases}$	$t_{ДТ}$ – время динамического торможения; $t_{П}$ – время пуска
Динамическое торможение – плавный пуск	$U(t) = \begin{cases} U_{ДТ}, & t \in (0; t_{ДТ}] \\ k_{ПП} \cdot t^{\nu}, & t \in (t_{ДТ}; t_{ПП}] \end{cases}$ $f(t) = \begin{cases} 0, & t \in (0; t_{ДТ}] \\ f_{c.}, & t \in (t_{ДТ}; t_{ПП}] \end{cases}$	$t_{ДТ}$ – время динамического торможения; $t_{П}$ – время пуска; $k_{ПП}$ – коэффициент кривой напряжения плавного пуска; ν – степень кривой напряжения плавного пуска
Динамическое торможение – частотный пуск	$U(t) = \begin{cases} U_{ДТ}, & t \in (0; t_{ДТ}] \\ k_{ЧП} \cdot t^{\nu_{ЧП}}, & t \in (t_{ДТ}; t_{ЧП}] \end{cases}$ $f(t) = \begin{cases} 0, & t \in (0; t_{ДТ}] \\ \alpha_{ЧП} \cdot t^{\mu_{ЧП}}, & t \in (t_{ДТ}; t_{ЧП}] \end{cases}$	$t_{ДТ}$ – время динамического торможения; $t_{ЧП}$ – время частотного пуска; $\nu_{ЧП}$ – степень кривой напряжения частотного пуска; $k_{ЧП}$ – коэффициент кривой напряжения частотного пуска; $\mu_{ЧП}$ – степень кривой частоты частотного пуска; $\alpha_{ЧП}$ – коэффициент кривой напряжения частотного пуска

Способ	Математическое описание	Примечание
<p style="text-align: center;">Частотное торможение – частотный пуск</p>	$U(t) = \begin{cases} k_{чТ} \cdot t^{v_{чТ}}, & t \in (0; t_{чТ}] \\ k_{чП} \cdot t^{v_{чП}}, & t \in (t_{чТ}; t_{чП}] \end{cases}$ $f(t) = \begin{cases} \alpha_{чТ} \cdot t^{\mu_{чТ}}, & t \in (0; t_{чТ}] \\ \alpha_{чП} \cdot t^{\mu_{чП}}, & t \in (t_{чТ}; t_{чП}] \end{cases}$	<p>$t_{чТ}$ – время частотного торможения; $t_{чП}$ – время частотного пуска; $v_{чТ}$ – степень кривой напряжения частотного торможения; $k_{чП}$ – коэффициент кривой напряжения частотного пуска; $\mu_{чП}$ – степень кривой частоты частотного пуска; $\alpha_{чП}$ – коэффициент кривой напряжения частотного пуска</p>

2.2.4 Разработка способа торможения и бездатчикового определения скорости и направления вращения в способе подхвата частоты

Частотное торможение электропривода заключается в подключении электродвигателя к источнику питания с обратным чередованием фаз с частотой питаемого напряжения близкой к частоте вращения ротора, и дальнейшем плавным уменьшением частоты до нуля.

Сложностью реализации данного способа является необходимость измерения, либо вычисления скорости авторотации вентилятора. Для непосредственного измерения скорости авторотации необходимо использование датчиков, что в описанных ранее условиях эксплуатации может быть затруднительным.

Для определения направления и скорости вращения автором предлагается, как описано в [87, 88], подать на две фазы обмотки статора постоянный ток, выполнить преобразование координат и фаз и перейти от токов трехфазной обмотки к вектору тока в неподвижной системе координат α - β (связанной со статором) и к подвижной системе координат d-q (связанной с ротором).

Постоянный ток двух фаз трёхфазной обмотки статора в подвижной системе координат d-q будет преобразован в две синусоидальные составляющие.

Преобразование фазных токов трехфазной обмотки статора i_A, i_B, i_C в проекции на оси неподвижной системы координат $(\acute{\alpha}, \beta)$ выполняются по формуле:

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= i_A, \\ i_{\beta} &= \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.30)$$

где $i_{\acute{\alpha}}$ и i_{β} – проекции вектора тока на оси неподвижной системы координат $(\acute{\alpha}, \beta)$,

Переход от неподвижной системы $(\acute{\alpha}, \beta)$ координат к вращающейся системе координат (d, q) выполняется по формулам:

$$\begin{aligned} i_d &= i_{\alpha} \cdot \cos \omega_k \cdot t + i_{\beta} \cdot \sin \omega_k \cdot t, \\ i_q &= i_{\beta} \cdot \cos \omega_k \cdot t - i_{\alpha} \cdot \sin \omega_k \cdot t \end{aligned} \quad (2.31)$$

В зависимости от фаз, по которым протекает постоянный ток, проекции вектора тока на оси неподвижной системы координат $(\acute{\alpha}, \beta)$ будут определяться различными формулами.

Для варианта, когда ток подаётся на фазы А и В, проекции вектора тока на оси неподвижной системы координат $(\acute{\alpha}, \beta)$ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= (\pm) I_A, \\ i_{\beta} &= (\mp) \frac{I_B}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Для варианта, когда ток подаётся на фазы А и С, проекции вектора тока на оси неподвижной системы координат $(\acute{\alpha}, \beta)$ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= (\pm) I_A, \\ i_{\beta} &= (\pm) \frac{I_C}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Для варианта, когда ток подаётся на фазы В и С, проекции вектора тока на оси неподвижной системы координат $(\acute{\alpha}, \beta)$ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= 0, \\ i_{\beta} &= (\pm) \frac{-(I_C + I_B)}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Знак \pm в выражениях (2.32) - (2.34) зависит от полярности подключения фаз к источнику постоянного тока.

На рисунке 2.8 представлено положение вектора тока при различных вариантах замыкаемых фаз и полярности их подключения.

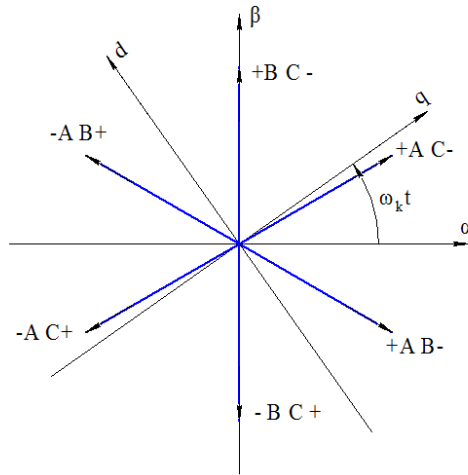


Рисунок 2.8 – Преобразование координат

Таким образом, от выбранного сочетания фаз, по которым протекает постоянный ток, и полярности их подключения зависит лишь начальная фаза токов в системе координат (d, q) .

На рисунке 2.9 представлены осциллограммы проекций i_d и i_q вектора тока для варианта, когда постоянный ток протекает по фазам В и С и рабочее колесо вращается по часовой стрелке (обратное вращение) и против часовой стрелки (вращение в рабочем режиме).

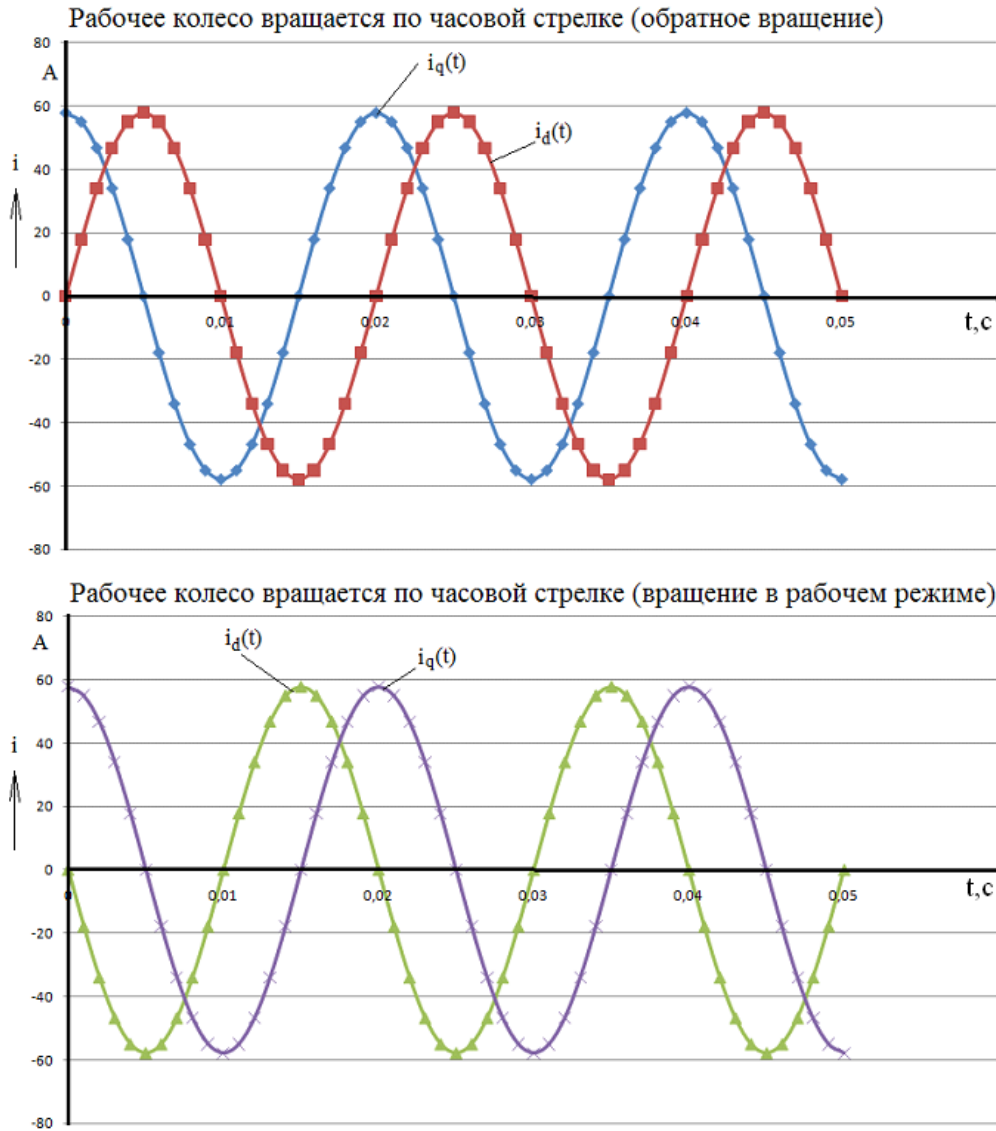


Рисунок 2.9 – Осциллограммы составляющих i_d и i_q вектора тока.

Из осциллограмм рисунка 2.9 видно, что составляющая тока i_d по оси d изменила свою фазу по отношению к току i_q на 180° . Это свойство тока i_d можно использовать для определения направления вращения вентилятора (электродвигателя).

Таким образом, суть предлагаемого способа торможения заключается в том, что в режиме определения направления и скорости вращения перед пуском электродвигателя необходимо подать постоянный ток на две фазы обмотки статора, система управления выполнит преобразование координат и фаз. На основе измерения длительности первого полупериода колебаний синусоид проекций вектора тока i_d и i_q определяется частота вращения. На

основе определения фазы проекций вектора тока i_d и i_q определяется направление вращения.

На основе вышеизложенного, реализуется способ бездатчикового определения скорости и направления вращения перед пуском электродвигателя, вал ротора которого может иметь вращение в направлении вращения в рабочем режиме или находится в режиме авторотации [51, 87, 88]. Вал ротора электродвигателя вращается в направлении рабочего режима в режиме свободного выбега вследствие высокого момента инерции рабочего колеса и ротора после отключения от электродвигателя от сети. При этом частотный пуск будет осуществлён не из состояния покоя, а выполнен подхват электродвигателя преобразователем частоты. В случае авторотации вентилятора вал ротора электродвигателя вращается обратного направления вращения в рабочем режиме, т.к. на рабочее колесо действует вращающий момент потоками рециркуляции воздуха. При авторотации пуск будет осуществляться после частотного останова ротора электродвигателя с подхватом электродвигателя преобразователем частоты и дальнейшим снижением частоты до нуля. В этом случае частотный пуск будет осуществлён с нулевой частоты вращения электродвигателя.

На рисунке 2.10 представлена схема, реализующая предлагаемый способ подхвата преобразователя частоты [28, 42, 51, 87, 88]. При поступлении команды на пуск электродвигателя на две фазы обмотки статора подаётся кратковременный сигнал. При этом под действием электромагнитного поля тока статора в роторе двигателя создается спадающий импульс тока. Под воздействием магнитного поля ротора, в обмотках статора наводится электродвижущая сила (ЭДС), частота которой равна частоте вращения. Направление вращения ротора определяется последовательностью чередования фаз в дополнительно введённом блоке.

При выбеге электродвигателя с данной измеренной частоты начинается разгон электродвигателя. При авторотации с данной измеренной частоты

начинается частотный останов электродвигателя и последующий частотный разгон.

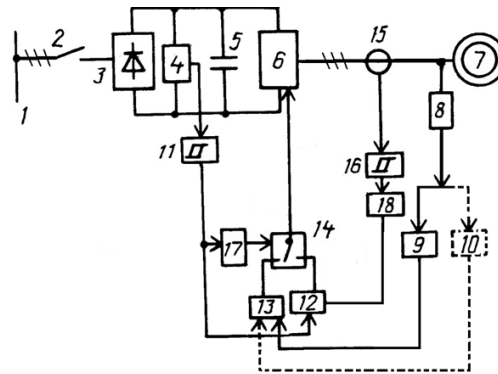


Рисунок 2.10 – Схема, реализующая предлагаемый способ подхвата преобразователя частоты

На рисунке представлены: 1 – шины питающей сети, 2 – выключатель, 3 – выпрямитель, 4 – датчики напряжения, 5 – конденсатор, 6 – инвертор напряжения, 7 – электродвигатель, 8 – датчик напряжения, 9 – блок определения частоты, 10 – блок определения последовательности чередования фаз, 11 – первый пороговый элемент, 12 – формирователь сигнала, 13 – блок управления инвертором, 14 – переключателя, выход 15 – датчики тока, 16 – второй пороговый элемент, 17 – первый блок задержки, 18 – второй блок задержки на появление сигнала.

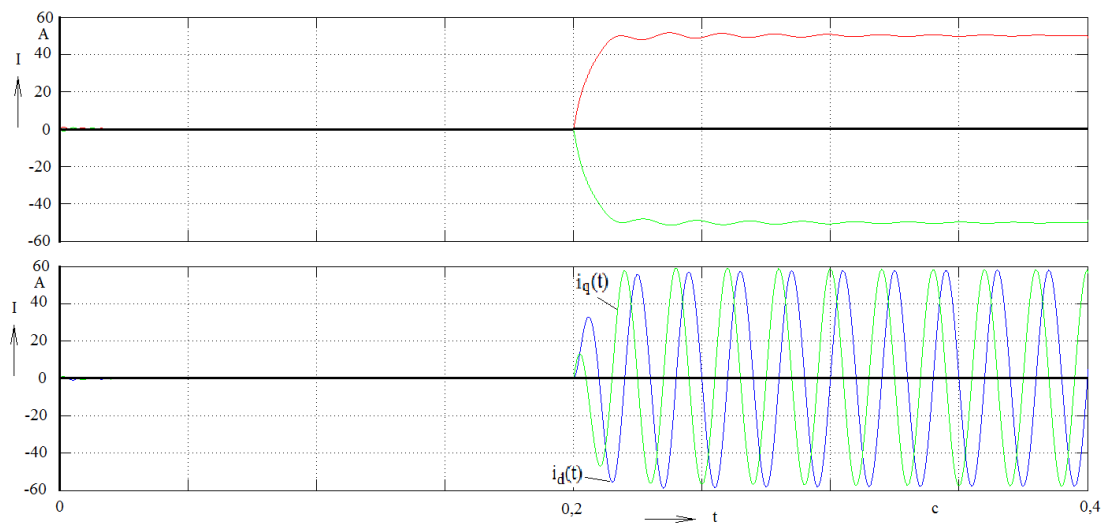


Рисунок 2.11 – Токи трёхфазной обмотки статора и осциллограммы проекций i_d и i_q вектора тока.

В промежутке времени 0 – 0,2 с рабочее колесо находится в авторотации, электродвигатель отключён от электрической сети. В момент времени 0,2 с принято решение о пуске вентилятора в работу. В промежутке времени 0,2 – 0,4 с по двум фазам трёхфазной обмотки статора протекает постоянный ток, который преобразуется в две синусоидальные

составляющие вектора тока i_d и i_q . Частота вращения определяется путём измерения длительности первого полупериода (периода) колебаний синусоид проекций вектора тока i_d и i_q . А направление вращения путём определения фазы составляющей вектора тока i_d по отношению к i_q . Таким образом, получаем начальное значение частоты, с которой надо начинать частотный останов перед пуском, а после останова производить частотный пуск.

2.3 Моделирование электромеханических процессов в электроприводе вентилятора при прямом пуске в режиме авторотации

Как отмечалось выше, пуск электродвигателя вентилятора в режиме авторотации вентилятора происходит увеличение времени пуска электродвигателя, связанное с поэтапностью пуска: торможением до нулевой скорости и последующим разгоном до номинальной скорости.

Результаты эксперимента, которые опубликованы в [12], свидетельствуют об увеличении времени пуска и увеличении пускового тока при пуске вентилятора, рабочее колесо которого вращается в обратную сторону, по сравнению со значениями при пуске из состояния покоя.

Для более детального изучения влияния рециркулирующего потока воздуха на переходные процессы разработана виртуальная имитационная модель электропривода вентилятора в пакете MATLAB [89, 90, 91, 92, 93], представленная на рисунке 2.12.

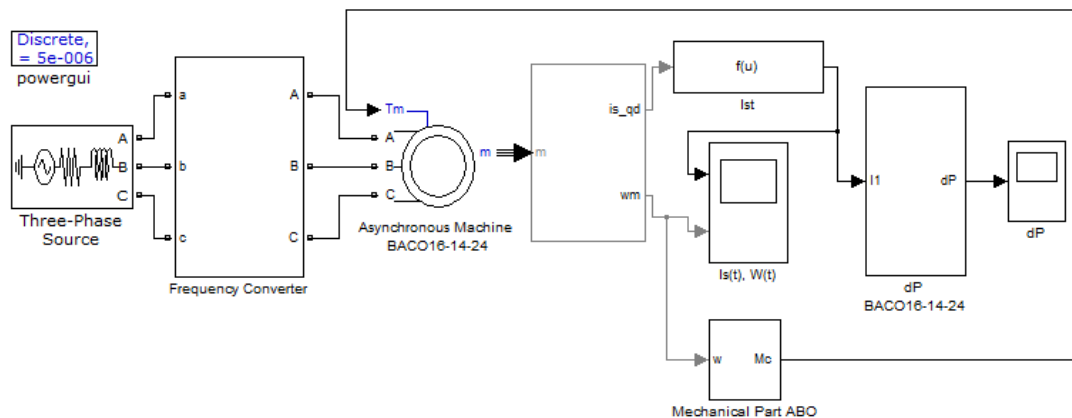


Рисунок 2.12 – Модель электропривода АВО газа в среде MATLAB.

Роль источников электроэнергии в модели выполняет источник трехфазного напряжения (Three-PhaseSource) – трансформатор 6/0,4 кВ мощностью 1000 кВА.

Блок «Frequency Converter» является моделью преобразователя частоты. При моделировании торможения противовключением и прямого пуска, преобразователь частоты отключается, а электродвигатель непосредственно подключается к сети. При моделировании динамического торможения используется выпрямитель преобразователя частоты в качестве источника постоянного напряжения и тормозной резистор, после снижения скорости до нуля электродвигатель непосредственно подключается к сети.

Модель преобразователя частоты состоит из неуправляемого трёхфазного мостового выпрямителя (Universal Bridge), фильтра в звене постоянного тока (L и C1), автономного инвертора напряжения (IGBT Inverter), выходного синусоидального фильтра (LC Filter), задатчиков частоты и амплитуды напряжения (Frequency и Mag) и подсистемы управления ключами инвертора (Subsystem). Модель представлена на рисунке 2.13.

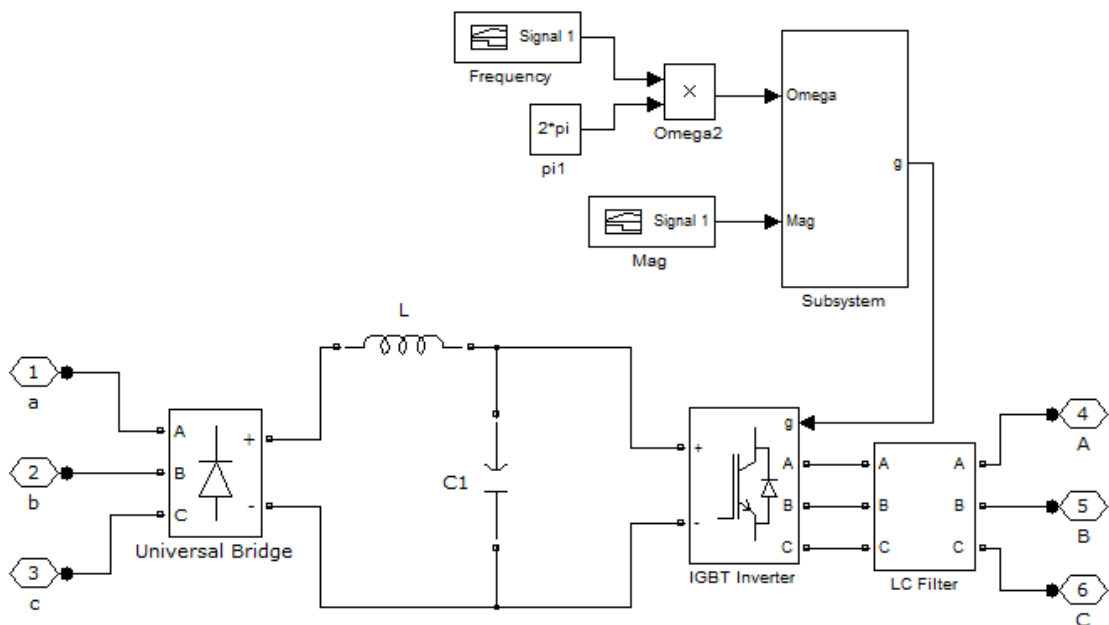


Рисунок 2.13 – Модель преобразователя частоты

Система управления, формирующая трёхфазную симметричную систему напряжений, представлена на рисунке 2.14. Для формирования импульсов управления служит генератор PWM Generator.

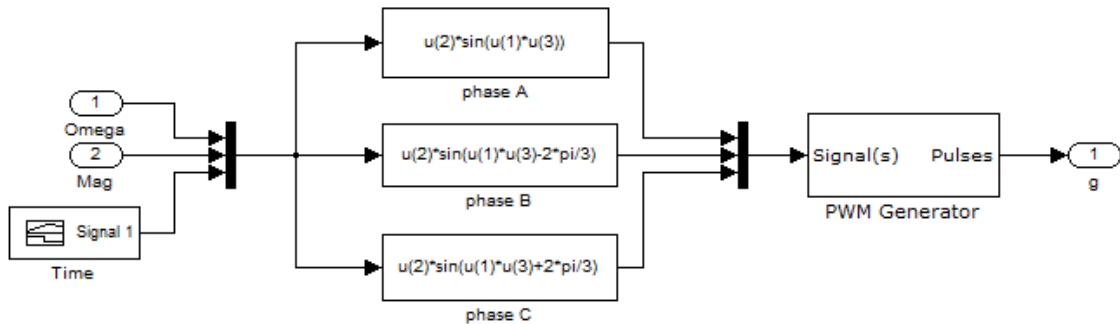


Рисунок 2.14 – Система управления инвертором

Моделью электродвигателя ВАСО 16-14-24 является стандартный блок «AsynchronousMachineВАСО16–14–24».

Модель нагрузки двигателя является блок «MechanicalPartАВО», который описывает рабочий участок механической характеристики вентилятора по выражению (2.2).

Расчет потерь электроэнергии выполняется в блоке «dPВАСО16–14–24» представленным на рисунке 2.15. Расчёт производится по формуле:

$$\Delta W = \int_0^{t_n} \frac{I_1^2}{I_{1\text{ном}}^2} \Delta P_{\text{ном}} dt, \quad (2.35)$$

где $I_{1\text{ном}}$ – номинальный ток обмотки статора, А;

I_1 – текущее значение обмотки статора, А,

$\Delta P_{\text{ном}}$ – номинальные потери обмотки статора, Вт.

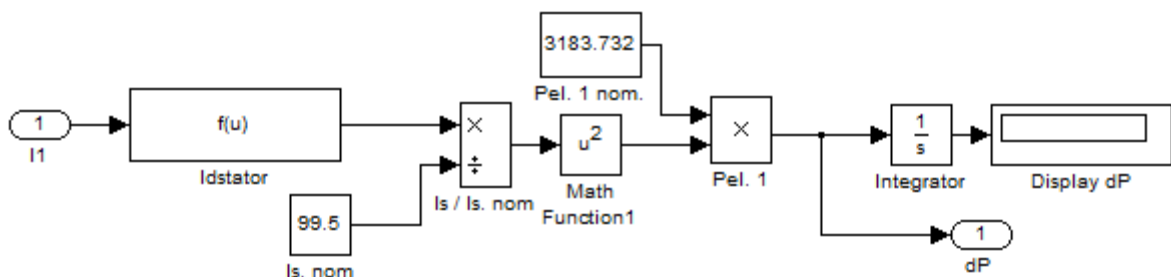


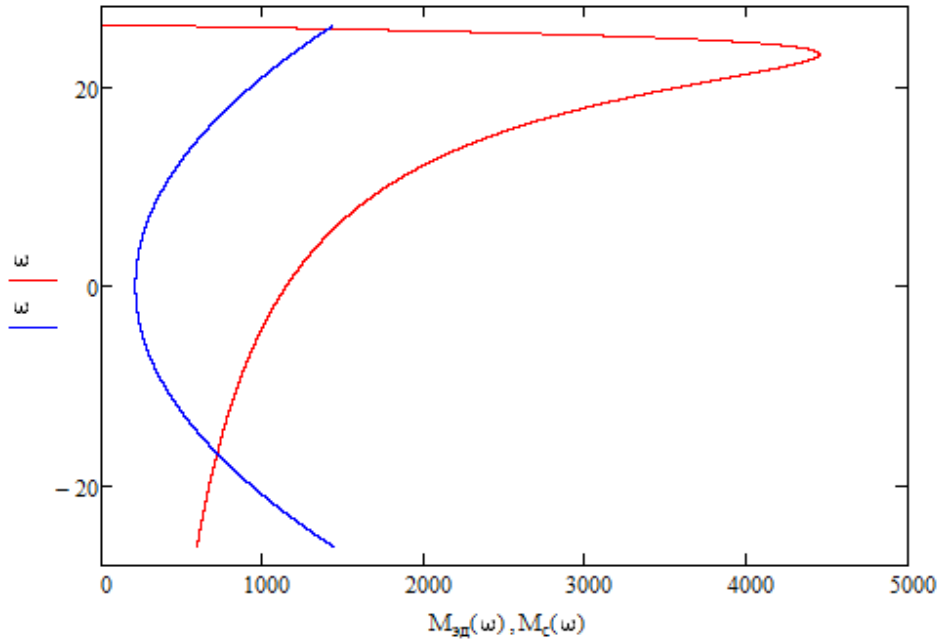
Рисунок 2.15 – Блок расчета потерь электроэнергии

Для получения временных характеристик тока в обмотке статора, угловой скорости и потерь электроэнергии в обмотке в модели применены осциллографы. На основе данной имитационной модели, получены время торможения при торможении противовключением, время прямого пуска, значение потерь электроэнергии в обмотке статора. Для оценки адекватности моделирования и подтверждения результатов необходимо провести аналитический расчёт времени пуска электродвигателя при различных скоростях начального вращения.

На рисунке 2.16 приведён листинг аналитического расчёта времени пуска в пакете Mathcad при различных значениях скорости вращения.

$$M_c(\omega) := M_{c0} + (M_{cном} - M_{c0}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2$$

$$M_{эд}(\omega) := \frac{3 \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot \frac{R_2}{\omega_0 - \omega}}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{\omega_0 - \omega} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}$$



ORIGIN := 1

Скольжение := (1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7)

S(i) := Скольжение_{1,i}

ω(i) := ω₀ · (1 - S(i))

M_cω_{нач}(i) := M_c(ω(i))

$$t_{тн}(i) := \int_{\omega(i)}^0 \frac{J}{M_{эд}(\omega) + M_c(\omega) - M_c\omega_{нач}(i)} d\omega$$

i := 1..8

$$t_n := \int_0^{\omega_{ном}} \frac{J}{M_{эд}(\omega) - M_c(\omega)} d\omega \rightarrow 9.116$$

$$t_{тн}(i) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.203 \\ 2.573 \\ 4.198 \\ 6.223 \\ 8.917 \\ 12.852 \\ 19.549 \end{pmatrix}$$

$$t(i) := t_{тн}(i) + t_n$$

$$t(i) = \begin{pmatrix} 9.116 \\ 10.319 \\ 11.689 \\ 13.314 \\ 15.339 \\ 18.033 \\ 21.968 \\ 28.666 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.16 – Аналитический расчёт времени пуска электропривода вентилятора в пакете Mathcad

Результаты аналитического расчёта и моделирования сведены в таблицы 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты моделирования и аналитического расчёта.

Начальное скольжение (начальная скорость вращения)	Время пуска в среде MATLAB (время торможения + время разгона), с	Время пуска в среде Mathcad (время торможения + время разгона), с	Изменение времени разгона вследствие учета снижения напряжения, %
$s = 1,0$ (0 мин^{-1})	10	9,1	9
$s = 1,1$ ($-2,62 \text{ мин}^{-1}$)	11,5 (1,5 + 10)	10,3 (1,2 + 9,1)	10
$s = 1,2$ ($-5,24 \text{ мин}^{-1}$)	13 (3 + 10)	11,7 (2,6 + 9,1)	10
$s = 1,3$ ($-7,86 \text{ мин}^{-1}$)	14,5 (4,5 + 10)	13,3 (4,2 + 9,1)	10
$s = 1,4$ ($-10,48 \text{ мин}^{-1}$)	17 (7 + 10)	15,3 (6,2 + 9,1)	10
$s = 1,5$ ($-13,1 \text{ мин}^{-1}$)	20 (10 + 10)	18 (8,9 + 9,1)	10
$s = 1,6$ ($-15,72 \text{ мин}^{-1}$)	25 (15 + 10)	22 (12,9 + 9,1)	12
$s = 1,7$ ($-18,34 \text{ мин}^{-1}$)	34,5 (24,5 + 10)	28,7 (19,6 + 9,1)	16,8
$s = 1,8$ ($-20,96 \text{ мин}^{-1}$)	Пуск невозможен		

Результаты, представленные в таблице 2.3, показывают, что расчётные значения времени пуска в среде Mathcad оказываются меньше значений времени пуска, полученных в результате моделирования в среде MATLAB. Это объясняется тем, что в модели электропривода АВО газа в среде MATLAB, электродвигатель получает питание от источника электроэнергии, который является моделью трансформатора 6/0,4 кВ мощностью 1000 кВА. При этом в процессе моделирования учитывается снижения напряжения на выводах трансформатора. Изменение напряжения на выводах трансформатора представлено на рисунке 2.17.

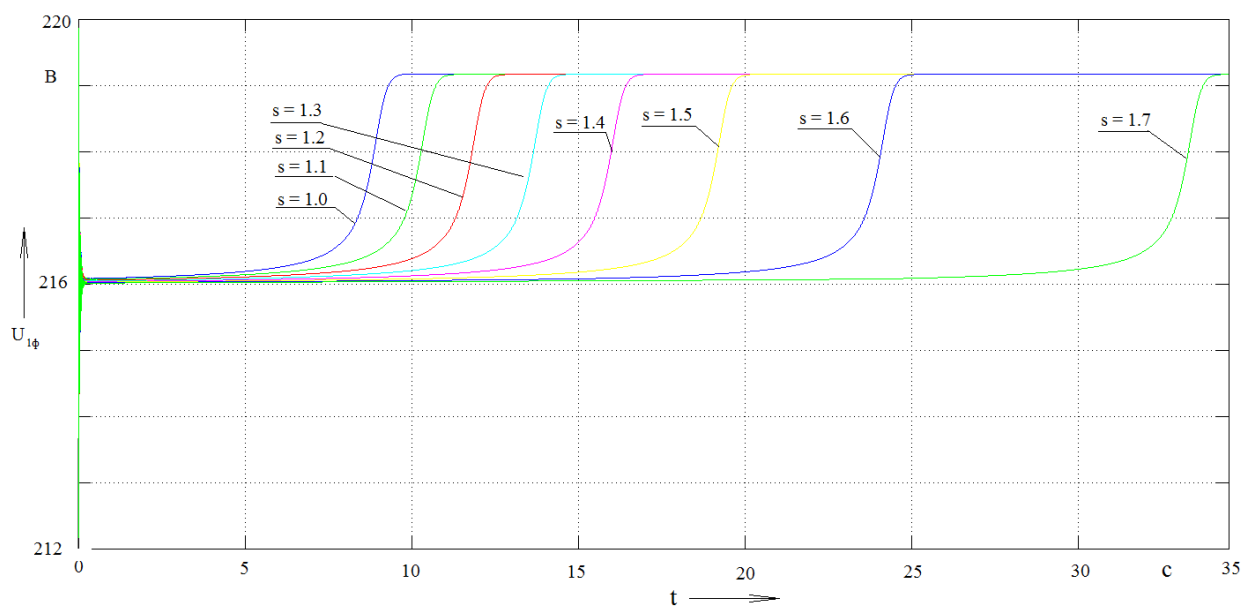


Рисунок 2.17 – Изменение фазного напряжения при торможении противовключением при наличии начального скольжения и последующего прямого пуска электропривода АВО газа

Потеря напряжения на участке электрической сети от трансформатора КТП до электродвигателя определяются по формуле:

$$\Delta U = I \cdot (R_T + R_{кл}) \cdot \cos\varphi + I \cdot (X_T + X_{кл}) \cdot \sin\varphi, \quad (2.36)$$

где I – ток на участке электрической сети;

$R_T, R_{кл}$ – активные сопротивления трансформатора и кабельной линии;

$X_T, X_{кл}$ – реактивные сопротивления трансформатора и кабельной линии;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности.

В процессе пуска, вследствие протекания пускового тока, происходит увеличение потери напряжения в питающей сети, и как следствие, уменьшение развиваемого электродвигателем момента, что приводит к увеличению времени пуска (затягиванию пуска). Это и является причиной разницы между результатами, полученными аналитическим расчётом и моделированием.

На рисунке 2.18 представлены временные характеристики тока в обмотке статора, угловой скорости и потерь в обмотке статора в зависимости от начального скольжения.

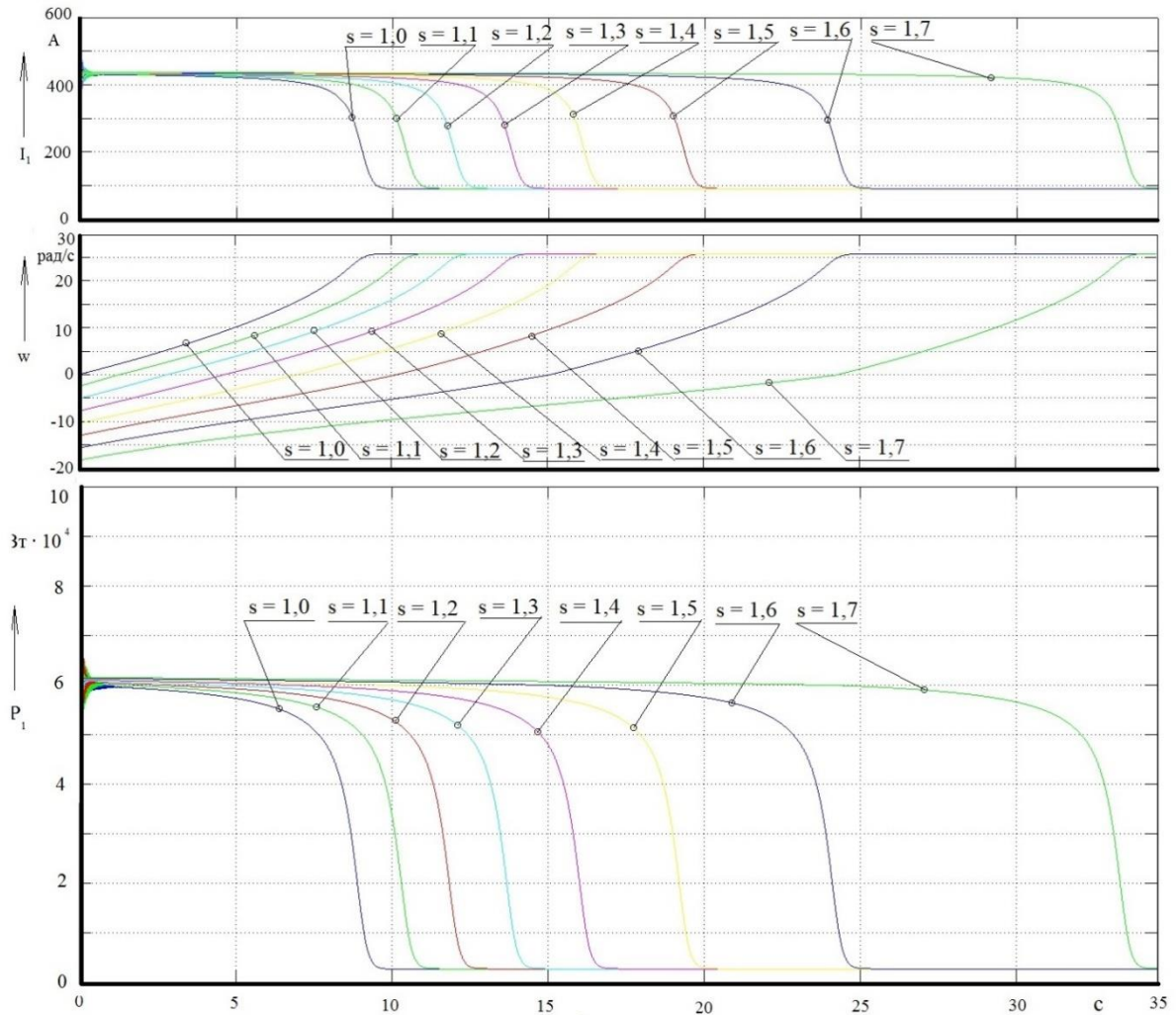


Рисунок 2.18 – Временные характеристики тока обмотки статора, угловой скорости и потерь мощности в обмотке статора

Из рисунка 2.18 видно, что при увеличении скорости вращения в обратную сторону, соответственно, начального скольжения в момент пуска вентилятора увеличивается время торможения, что приводит к увеличению времени протекания пускового тока и потерь электроэнергии в обмотке статора.

В целях оценки изменения ресурса работы электродвигателя в исследуемых режимах производится расчёт температуры обмотки статора на основе значений потерь электроэнергии в обмотке статора за время пуска, полученных в результате моделирования в среде Matlab.

Температура нагрева обмотки статора Θ_1 определяется по формуле [66 – 80]:

$$\Theta_1 = \Theta_0 + \frac{\Delta P_1}{m_1 \cdot C_1} \quad (2.37)$$

где Θ_0 – температура охлаждающей среды (принимается 40°C);

ΔP_1 – потери электроэнергии в обмотке статора за время пуска,

C_1, m_1 – удельная теплоёмкость и масса проводникового материала обмотки статора, кг.

Таблица 2.4 – Результаты моделирования.

Начальное скольжение (начальная скорость вращения)	Потери электроэнергии в обмотке статора за время пуска, Вт·с (кВт·ч)	Температура нагрева обмотки в конце пуска, $^\circ\text{C}$
$s = 1,0$ (0 мин^{-1})	$5,0 \cdot 10^5$ (0,139)	52,7
$s = 1,1$ ($-2,62 \text{ мин}^{-1}$)	$5,8 \cdot 10^5$ (0,161)	54,7
$s = 1,2$ ($-5,24 \text{ мин}^{-1}$)	$6,7 \cdot 10^5$ (0,186)	57
$s = 1,3$ ($-7,86 \text{ мин}^{-1}$)	$7,8 \cdot 10^5$ (0,217)	59,7
$s = 1,4$ ($-10,48 \text{ мин}^{-1}$)	$9,3 \cdot 10^5$ (0,258)	63,5
$s = 1,5$ ($-13,1 \text{ мин}^{-1}$)	$11,2 \cdot 10^5$ (0,311)	68,4
$s = 1,6$ ($-15,72 \text{ мин}^{-1}$)	$14,2 \cdot 10^5$ (0,394)	75,9
$s = 1,7$ ($-18,34 \text{ мин}^{-1}$)	$19,8 \cdot 10^5$ (0,55)	90,1
$s = 1,8$ ($-20,96 \text{ мин}^{-1}$)	Пуск невозможен	

Результаты, представленные в таблице 2.4, показывают, что с увеличением значения скорости вращения в обратную сторону в момент пуска вентилятора, увеличиваются и потери в обмотке статора и температура её нагрева в конце пуска.

Для обеспечения долговечности электродвигателей использовать их при напряжении выше 110 и ниже 90% от номинального не рекомендуется [94 – 100].

С помощью разработанной имитационной модели проведём исследование влияния величины напряжения питания в указанных

разрешённых диапазонах на время пуска, потери электроэнергии за время пуска и температуру нагрева обмотки статора.

Результаты приведены в таблицы 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты моделирования.

Скольжение в момент пуска вентилятора	s = 1,0	s = 1,1	s = 1,2	s = 1,3	s = 1,4	s = 1,5	s = 1,6	s = 1,7	s = 1,8
$U = U_{\text{ном}} (380 \text{ В})$									
Время пуска, с	10	11,5	13	14,5	17	20	25	34,5	-
Потери электроэнергии в обмотке статора, Вт·с (кВт·ч)	$5,0 \cdot 10^5$ (0,14)	$5,8 \cdot 10^5$ (0,16)	$6,7 \cdot 10^5$ (0,19)	$7,8 \cdot 10^5$ (0,22)	$9,3 \cdot 10^5$ (0,26)	$11,2 \cdot 10^5$ (0,31)	$14,2 \cdot 10^5$ (0,39)	$19,8 \cdot 10^5$ (0,55)	-
Температура нагрева обмотки, °С	52,7	54,7	57	59,7	63,5	68,4	75,9	90,1	-
$U = 1,1 \cdot U_{\text{ном}} (420 \text{ В})$									
Время пуска, с	7,5	9	10	11,5	13,5	16	19	24,5	35
Потери электроэнергии в обмотке статора, Вт·с (кВт·ч)	$4,7 \cdot 10^5$ (0,13)	$5,5 \cdot 10^5$ (0,15)	$6,4 \cdot 10^5$ (0,18)	$7,5 \cdot 10^5$ (0,21)	$8,9 \cdot 10^5$ (0,25)	$10,6 \cdot 10^5$ (0,3)	$13,0 \cdot 10^5$ (0,38)	$16,9 \cdot 10^5$ (0,47)	$24,6 \cdot 10^5$ (0,68)
Температура нагрева обмотки, °С	51,9	53,9	56,2	59	62,5	66,8	72,9	82,8	102,3
$U = 0,9 \cdot U_{\text{ном}} (340 \text{ В})$									
Время пуска, с	13	15	17	19,5	23	27,5	36	-	-
Потери электроэнергии в обмотке статора, Вт·с (кВт·ч)	$5,4 \cdot 10^5$ (0,15)	$6,2 \cdot 10^5$ (0,17)	$7,2 \cdot 10^5$ (0,2)	$8,3 \cdot 10^5$ (0,23)	$9,9 \cdot 10^5$ (0,28)	$12,2 \cdot 10^5$ (0,34)	$16,3 \cdot 10^5$ (0,45)	-	-
Температура нагрева обмотки, °С	53,7	55,7	58,2	61	65	70,9	81,3	-	-

Питание электродвигателя повышенным напряжением $U = 1,1 \cdot U_{\text{ном}}$ приводит к уменьшению времени пуска, в связи увеличением момента, развиваемого электродвигателем при пропорциональности момента квадрату напряжения питания. Поэтому пуск возможен при большей скорости авторотации, при которой возможен прямой пуск. Также этой же причине при уменьшении напряжения происходит увеличение времени пуска и скорость авторотации при которой возможен прямой пуск снижается [79].

При работе УАВО газа количество работающих электродвигателей вентиляторов изменяется по различным причинам. К примеру, в зимний период эксплуатации, при низкой температуре наружного воздуха, в работе находится малая часть вентиляторов. В летний период времени для охлаждения газа требуется значительное количество вентиляторов, и нередки режимы, когда все установленные вентиляторы находятся в работе.

Проанализируем на модели влияние количества включённых вентиляторов на переходные процессы при пуске в режиме авторотации вентилятора

В таблицы 2.6 представлены результаты моделирования, которые учитывают число включенных вентиляторов для одновременно работающих 7 и 9 вентиляторов.

Таблица 2.6 – Результаты моделирования

Число работающих электродвигателей		7			9		
		$0,9U_{\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$1,1U_{\text{ном}}$	$0,9U_{\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$1,1U_{\text{ном}}$
s=1	Время разгона, с	13,5	10	8,0	14	11	8,5
	Потери, Вт	$5,4 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^5$	$4,8 \cdot 10^5$	$5,5 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^5$	$4,8 \cdot 10^5$
	Температура, °C	53,7	52,7	52,2	53,9	52,9	52,2
s=1,1	Время разгона, с	15,5	12	9,5	16	12,5	10
	Потери, Вт	$6,3 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^5$	$5,6 \cdot 10^5$	$6,4 \cdot 10^5$	$5,9 \cdot 10^5$	$5,6 \cdot 10^5$
	Температура, °C	55,9	54,7	54,2	56,2	54,9	54,2

s=1,2	Время разгона, с	17,5	13,5	10,5	18	14	11
	Потери, Вт	$7,2 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^5$	$7,3 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^5$	$6,7 \cdot 10^5$
	Температура, °C	58,2	57,2	56,5	58,5	57,2	57
s=1,3	Время разгона, с	20	15	12	20,5	15,5	12,5
	Потери, Вт	$8,4 \cdot 10^5$	$7,9 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^5$	$7,9 \cdot 10^5$	$7,6 \cdot 10^5$
	Температура, °C	61,3	60	59	61,5	60	59,2
s=1,4	Время разгона, с	23,5	17,5	13,5	24	18	14
	Потери, Вт	$10 \cdot 10^5$	$9,3 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^5$	$10,1 \cdot 10^5$	$9,3 \cdot 10^5$	$9,0 \cdot 10^5$
	Температура, °C	65,3	63,5	62,5	65,6	63,5	62,8
s=1,5	Время разгона, с	28,5	21	16	29	21,5	16,5
	Потери, Вт	$12,3 \cdot 10^5$	$11,3 \cdot 10^5$	$10,6 \cdot 10^5$	$12,4 \cdot 10^5$	$11,3 \cdot 10^5$	$10,7 \cdot 10^5$
	Температура, °C	71,1	68,6	66,8	71,4	68,6	67
s=1,6	Время разгона, с	37,5	26	19,5	38	26,5	19,5
	Потери, Вт	$16,6 \cdot 10^5$	$14,3 \cdot 10^5$	$13,1 \cdot 10^5$	$16,7 \cdot 10^5$	$14,2 \cdot 10^5$	$13,1 \cdot 10^5$
	Температура, °C	82	76,2	73,2	82,3	75,9	73,2
s=1,7	Время разгона, с	-	35,5	25	-	36	25
	Потери, Вт	-	$20,1 \cdot 10^5$	$17,1 \cdot 10^5$	-	$20,2 \cdot 10^5$	$17,1 \cdot 10^5$
	Температура, °C	-	90,9	83,3	-	91,1	83,3
s=1,8	Время разгона, с	-	-	36	-	-	36
	Потери, Вт	-	-	$25,1 \cdot 10^5$	-	-	$25,1 \cdot 10^5$
	Температура, °C	-	-	103,5	-	-	103,5

С увеличением числа включенных вентиляторов время пуска очередного вентилятора увеличивается, что связано с большим падением напряжения при пуске вентилятора от нагруженного трансформатора.

2.4 Моделирование динамического торможения и последующего прямого пуска вентилятора АВО газа

Учитывая тот факт, что наилучшие показатели качества выпрямляемого напряжения по гармоническому составу имеет трёхфазная

мостовая схема при моделировании динамического торможения используем трёхфазную мостовую схему, представленную на рисунке 2.19.

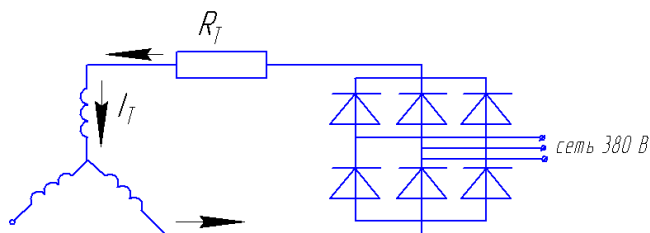


Рисунок 2.19 – Схема получения подключения АД в режиме ДТ

Постоянный ток I_T в такой схеме динамического торможения, учитывая известное соотношение для постоянной составляющей выпрямленного напряжения (среднего значения) и закона Ома, можно определить по формуле:

$$I_T = \frac{3 \cdot \sqrt{6} U_1}{\pi (R_T + 2 \cdot R_1)}, \quad (2.38)$$

где U_1 – действующее значение фазного напряжения сети, В;

R_T – сопротивление тормозного резистора, Ом,

R_1 – сопротивление фазы обмотки статора, Ом.

Анализируя выражение (2.38) видно, что постоянный ток I_T зависит от величины R_T . Таким образом, величина R_T определяет тормозной момент, время торможения и, соответственно, потери электроэнергии в процессе торможения.

Максимальный момент M_m и соответствующее ему максимальное скольжение s_m . [52 – 58]:

$$M_m = \frac{3 \cdot (0,82 \cdot I_T^2) \cdot X_\mu^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (X_\mu + X_2')}, \quad (2.39)$$

где X_μ – индуктивное сопротивление цепи намагничивания, Ом;

X_2' – индуктивное сопротивление ротора, Ом,

ω_0 – синхронная частота вращения, рад/с.

$$s_{m.} = \frac{R_2'}{(X_{\mu} + X_2')} \quad (2.40)$$

Для решения задачи выбора оптимальной величины тормозного резистора по критерию величины потерь электроэнергии в процессе торможения (нагреву обмотки статора) и динамических усилий на обмотку статора в процессе торможения необходимо описать ограничения на величину постоянного тока.

Максимальное значение постоянного тока, при динамическом торможении, ограничивается пусковым током электродвигателя. Это ограничение связано с допустимыми значениями электродинамических усилий на обмотку статора, рассчитываемого при проектировании электродвигателя. Номинальный ток электродвигателя 99,5 А, а кратность пускового тока 4,5. Максимальное значение постоянного тока составляет 447 А.

Задаваясь значением постоянного тока из формулы (2.38) можно выразить значение сопротивления тормозного резистора, которое будет обеспечивать заданное значение постоянного тока:

$$R_{T.} = \frac{3 \cdot \sqrt{6} U_1}{I_{T.}} - 2 \cdot R_1 \quad (2.42)$$

Минимальное значение тормозного резистора $R_{T.мин.}$ по формуле (2.42) составляет:

$$R_{T. мин.} = \frac{514}{447} - 2 \cdot 0,11 = 0,93 \text{ Ом}$$

Минимальное значение постоянного тока ограничивается величиной момента, развиваемого электродвигателем при успешном пуске вентиляторов режиме авторотации с максимальной скоростью вращения, выше которой пуск становится невозможным.

Момент развиваемый электродвигателем $M(\omega)$ определяется выражением [53 – 58]:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s}}{\omega_0 \left[\left(R_1' + \frac{R_2'}{s} \right) + (X_1' + X_2')^2 \right]}, \quad (2.43)$$

где R_1' – активное сопротивление обмотки статора, Ом,

X_1' – индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом.

Используя результаты моделирования, представленные в таблице 2.3, находим, что максимальная скорость вращения в обратном направлении при которой возможно торможение противовключением и последующий прямой пуск составляет 18,34 рад/с. Момент, развиваемый электродвигателем при этой скорости $M_{ЭД}(-18,34)$, по формуле (2.43), равен 700 Н·м.

Приняв это значение за минимальное, используя формулы (2.38) найдём минимальное значение постоянного тока $I_{п\ мин} = 328$ А.

Максимальное значение тормозного резистора $R_{Т.макс.}$ по формуле (2.42) составляет:

$$R_{Т.макс.} = \frac{514}{328} - 2 \cdot 0,11 \approx 1,35 \text{ Ом.}$$

Таким образом, используя описанные ограничения, получены значения тормозного резистора $1,0 \text{ Ом} \leq R_{Т.} \leq 1,35 \text{ Ом}$.

Подбор величины тормозного резистора, из указанного диапазона, будет проведён исходя из минимума потерь электроэнергии в обмотке статора в процессе торможения, а значит и минимального нагрева обмотки статора. С этой целью проведен аналитический расчёт переходного процесса при динамическом торможении и последующем прямом пуске, при различных значениях тормозного резистора, в среде Mathcad. Листинг программы представлен на рисунке 2.20.

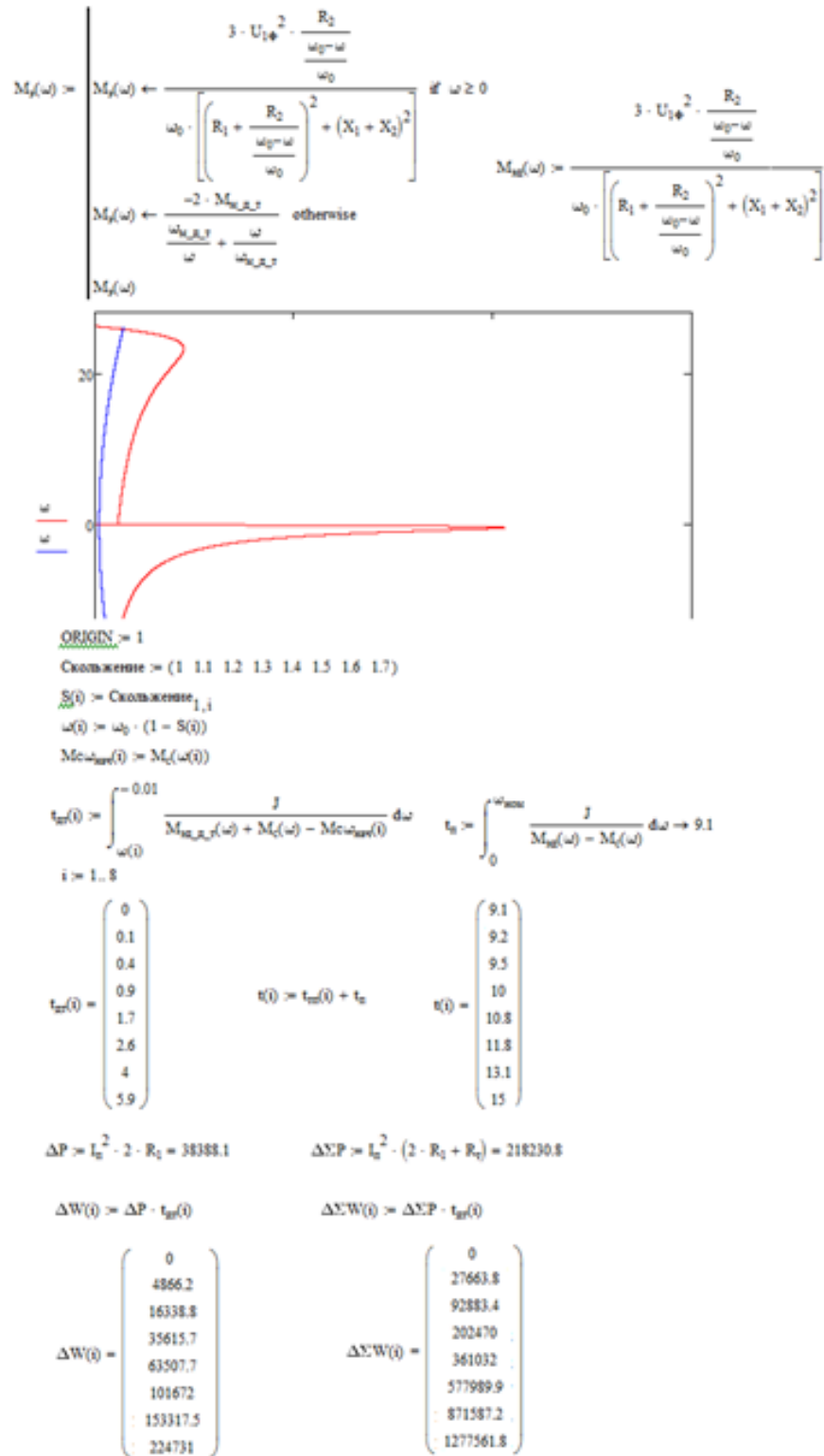


Рисунок 2.20 – Аналитический расчёт времени пуска электропривода вентилятора в пакете Mathcad

Таблица 2.7 – Потери мощности в обмотке статора и время динамического торможения

Начальное скольжение (начальная скорость вращения)	Значение тормозного резистора R_T , Ом							
	1,0		1,1		1,25		1,35	
	ΔP , Вт	t, с	ΔP , Вт	t, с	ΔP , Вт	t, с	ΔP , Вт	t, с
$s = 1,0$ (0 рад/с)	-	0	-	0	-	0	-	0
$s = 1,1$ (-2,62 рад/с)	38388,1	0,13	32765,3	0,15	26392,8	0,18	23124,6	0,21
$s = 1,2$ (-5,24 рад/с)		0,43		0,5		0,62		0,71
$s = 1,3$ (-7,86 рад/с)		0,93		1,09		1,36		1,55
$s = 1,4$ (-10,48 рад/с)		1,65		1,95		2,44		2,81
$s = 1,5$ (-13,1 рад/с)		2,65		3,14		3,98		4,6
$s = 1,6$ (-15,72 рад/с)		3,99		4,78		6,16		7,24
$s = 1,7$ (-18,34 рад/с)		5,85		7,13		9,48		11,43

Результаты, представленные в таблице 2.7, показывают, что при увеличении значения тормозного резистора потери мощности уменьшаются, а время торможения увеличивается.

Таблица 2.8 – Потери электроэнергии в обмотке статора

Начальное скольжение (начальная скорость вращения)	Потери электроэнергии в обмотке статора в процессе динамического торможения, Вт·с (кВт·ч)			
	Значение тормозного резистора R_T , Ом			
	1,0	1, 1	1, 25	1, 35
$s = 1,0$ (0 рад/с)	-	-	-	-
$s = 1,1$ (-2,62 рад/с)	$4,9 \cdot 10^3$ (0,0014)	$4,9 \cdot 10^3$ (0,0014)	$4,9 \cdot 10^3$ (0,0014)	$4,9 \cdot 10^3$ (0,0014)
$s = 1,2$ (-5,24 рад/с)	$16,3 \cdot 10^3$ (0,005)	$16,4 \cdot 10^3$ (0,005)	$16,4 \cdot 10^3$ (0,005)	$16,4 \cdot 10^3$ (0,005)
$s = 1,3$ (-7,86 рад/с)	$35,6 \cdot 10^3$ (0,01)	$35,7 \cdot 10^3$ (0,01)	$35,8 \cdot 10^3$ (0,01)	$35,9 \cdot 10^3$ (0,01)
$s = 1,4$ (-10,48 рад/с)	$63,5 \cdot 10^3$ (0,018)	$63,9 \cdot 10^3$ (0,018)	$64,5 \cdot 10^3$ (0,018)	$64,9 \cdot 10^3$ (0,018)
$s = 1,5$ (-13,1 рад/с)	$101,7 \cdot 10^3$ (0,028)	$102,9 \cdot 10^3$ (0,029)	$104,9 \cdot 10^3$ (0,029)	$106,7 \cdot 10^3$ (0,029)
$s = 1,6$ (-15,72 рад/с)	$153,3 \cdot 10^3$ (0,043)	$156,7 \cdot 10^3$ (0,044)	$162,6 \cdot 10^3$ (0,045)	$167,3 \cdot 10^3$ (0,046)
$s = 1,7$ (-18,34 рад/с)	$224,7 \cdot 10^3$ (0,062)	$234,0 \cdot 10^3$ (0,065)	$250,3 \cdot 10^3$ (0,07)	$264,3 \cdot 10^3$ (0,073)

По результатам аналитического расчёта переходного процесса, представленным в таблице 2.7 и 2.8, видно, что с увеличением величины тормозного резистора (уменьшением значения постоянного тока) потери мощности уменьшаются, но и увеличивается время торможения (таблица 2.7), что приводит к увеличению потерь электроэнергии (таблица 2.8). Наименьшие потери электроэнергии и соответственно наименьший нагрев обмотки статора, при использовании описанных выше ограничений, обеспечивается при значении тормозного резистора 1,0 Ом.

Для моделирования в среде MATLAB электромеханических процессов в электроприводе АВО газа комбинированного способа пуска «динамическое торможение – прямой пуск» значение тормозного резистора принимается $R_T = 1,0$ Ом, при котором обеспечиваются минимальные потери электроэнергии.

В таблице 2.9 приводятся значения времени пуска и потерь электроэнергии в процессе пуска, полученные в результате моделирования в среде MATLAB, при динамическом торможении и последующим прямым пуске.

Таблица 2.9 – Результаты моделирования в среде MATLAB

Начальное скольжение (начальная скорость вращения)	Время пуска в среде MATLAB (время торможения + время разгона), с	Потери электроэнергии в электродвигателе в процессе пуска, Вт·с (кВт*ч)
$s = 1,0$ (0 мин ⁻¹)	10	$5,0 \cdot 10^5$ (0,139)
$s = 1,1$ (-2,62 мин ⁻¹)	10,2 (0,2 + 10)	$5,1 \cdot 10^5$ (0,141)
$s = 1,2$ (-5,24 мин ⁻¹)	10,55 (0,55 + 10)	$5,3 \cdot 10^5$ (0,147)
$s = 1,3$ (-7,86 мин ⁻¹)	11,1 (1,1 + 10)	$5,55 \cdot 10^5$ (0,154)
$s = 1,4$ (-10,48 мин ⁻¹)	11,9 (1,9 + 10)	$5,8 \cdot 10^5$ (0,161)
$s = 1,5$ (-13,1 мин ⁻¹)	12,8 (2,8 + 10)	$6,2 \cdot 10^5$ (0,172)
$s = 1,6$ (-15,72 мин ⁻¹)	14,2 (4,2 + 10)	$6,7 \cdot 10^5$ (0,186)
$s = 1,7$ (-18,34 мин ⁻¹)	16,0 (6,0 + 10)	$7,4 \cdot 10^5$ (0,206)
$s = 1,8$	запуск невозможен	

Сравнивая результаты, представленные в таблицах 2.7, 2.8 и 2.9 видно, что применение динамического торможения приводит к уменьшению времени торможения и уменьшению потерь электроэнергии по сравнению с торможением противовключением.

Таблица 2.10 – Результаты моделирования в среде MATLAB и аналитического расчёта в среде Mathcad.

Начальная скорость вращения вентилятора	Время разгона в среде MATLAB, с	Время разгона в среде Mathcad, с	Изменение времени разгона вследствие учета снижения напряжения, %
$s = 1,0 (0 \text{ мин}^{-1})$	10	9,1	9
$s = 1,1 (-2,62 \text{ мин}^{-1})$	10,2 (0,2 + 10)	9,23 (0,13 + 9,1)	9,5
$s = 1,2 (-5,24 \text{ мин}^{-1})$	10,55 (0,55 + 10)	9,53 (0,43 + 9,1)	9,6
$s = 1,3 (-7,86 \text{ мин}^{-1})$	11,1 (1,1 + 10)	10,03 (0,93 + 9,1)	9,6
$s = 1,4 (-10,48 \text{ мин}^{-1})$	11,8 (1,8 + 10)	10,75 (1,65 + 9,1)	8,9
$s = 1,5 (-13,1 \text{ мин}^{-1})$	12,8 (2,8 + 10)	11,75 (2,65 + 9,1)	8,2
$s = 1,6 (-15,72 \text{ мин}^{-1})$	14,2 (4,2 + 10)	13,09 (3,99 + 9,1)	7,8
$s = 1,7 (-18,34 \text{ мин}^{-1})$	16,0 (6,0 + 10)	14,95 (5,85 + 9,1)	6,6

Расчётные значения времени пуска в среде Mathcad оказываются меньше значений времени пуска, полученных в результате моделирования в среде MATLAB. Это объясняется тем, что в модели электропривода АВО газа в среде MATLAB, электродвигатель получает питание от источника электроэнергии, который является моделью трансформатора 6/0,4 кВ мощностью 1000 кВА. При этом в процессе моделирования учитывается снижение напряжения на выводах трансформатора.

На рисунке 2.21 представлены временные характеристики тока в обмотке статора, угловой скорости и потерь электроэнергии в обмотке статора.

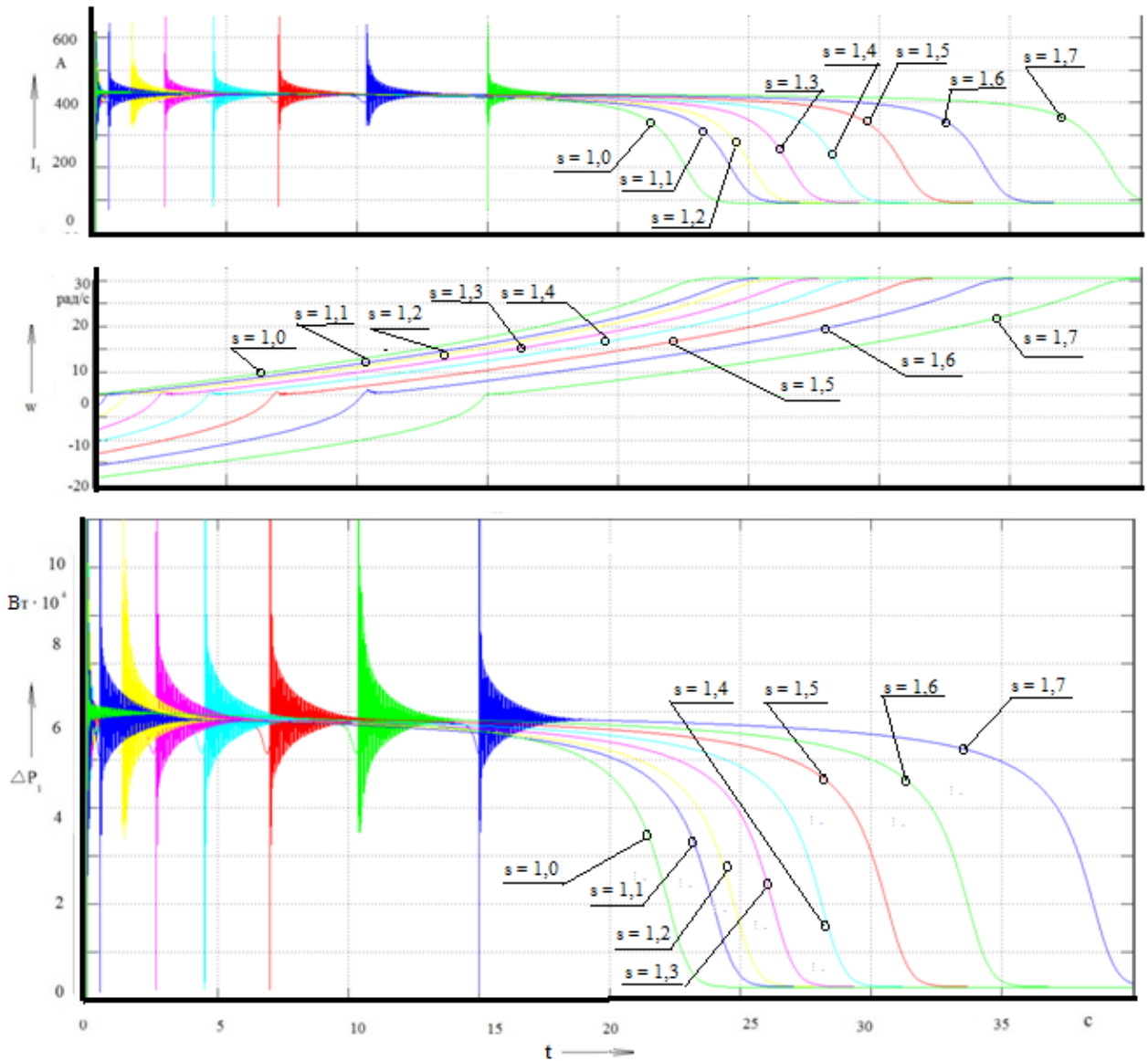


Рисунок 2.21 – Временные характеристики тока в обмотке статора, угловой скорости и потерь электроэнергии при динамическом торможении и последующем прямом пуске

2.5 Моделирование ЧРП АВО газа при авторотации вентилятора

Функция комбинированного пуска «частотный останов - частотный пуск» с использованием подхвата преобразователя частоты реализуется в частотно-регулируемом электроприводе.

График, полученный в результате моделирования для скорости авторотации $\omega = -5,24$ об/с, приведен рисунке 2.22.

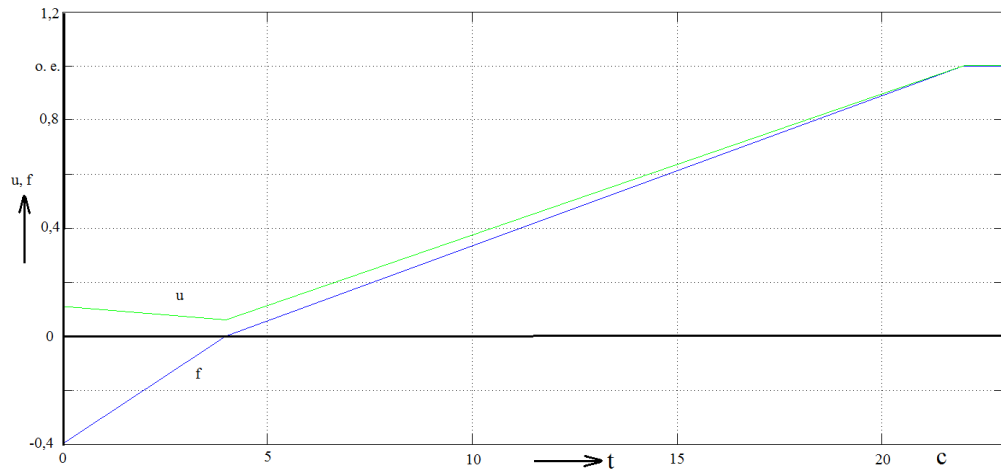


Рисунок 2.22 – Временные характеристики частоты и амплитуды напряжения в относительных единицах при авторотации со скоростью $\omega = -5,24$ об/с

Частотный останов двигателя происходит на отрезке времени 0 – 3,6 секунд на которой частота питающего напряжения изменяется от $-0,16$ до 0 в относительных единицах. После остановки рабочего колеса в момент времени 3,6 секунды производится частотный пуск вентилятора.

На рисунке 2.23 представлены временные характеристики тока статора, угловой скорости и потерь электроэнергии в обмотке статора при реализации описанного способа управления при различных скоростях авторотации.

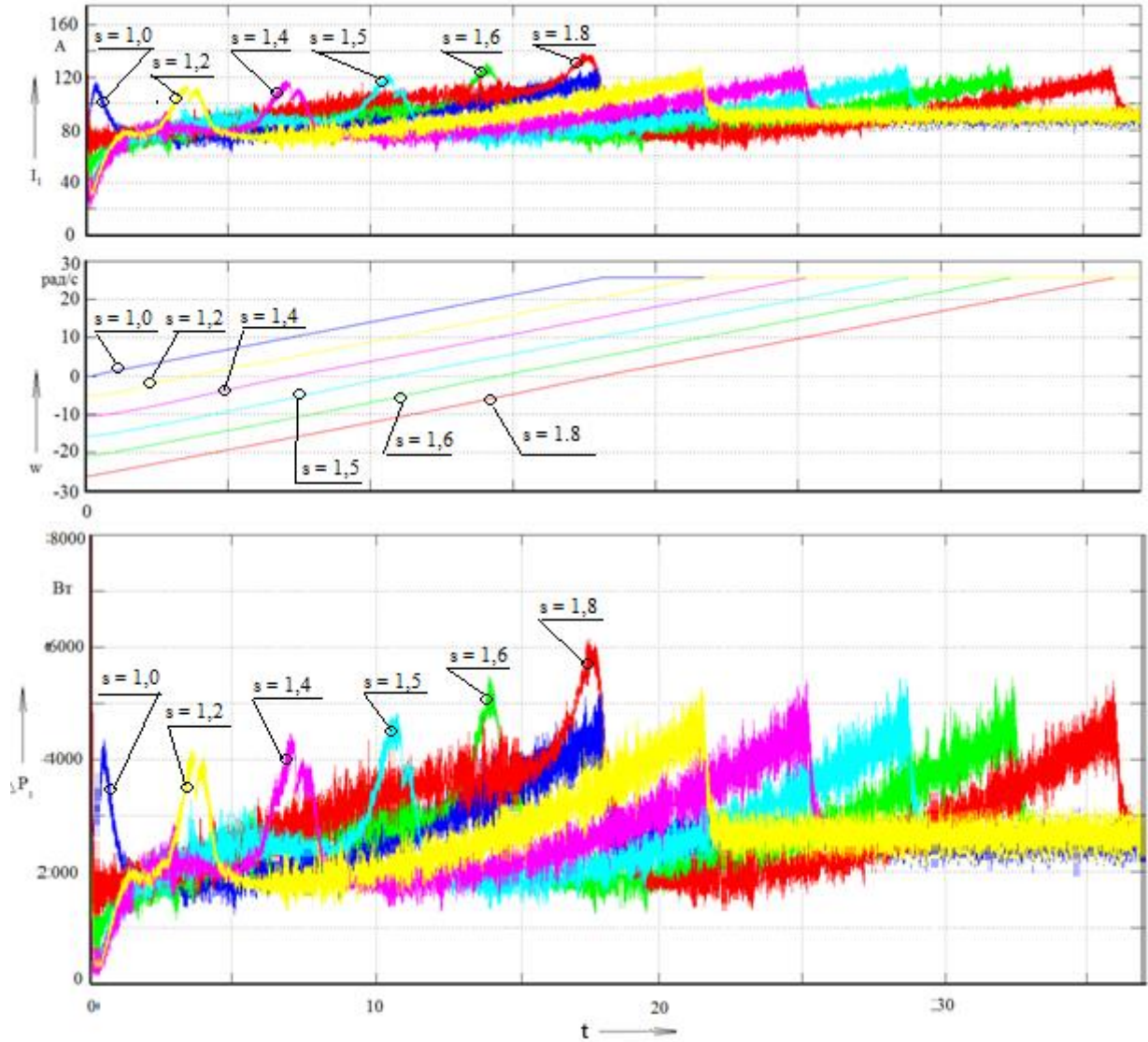


Рисунок 2.23 – Временные характеристики тока статора, угловой скорости и потерь мощности в обмотке статора при частотном останове и последующим частотном пуске при различных величинах начального скольжения

Таблица 2.11 – Результаты моделирования

Начальное скольжение (начальная скорость вращения)	Время пуска в среде MATLAB (время торможения + время разгона), с	Потери электроэнергии в обмотке статора за время пуска, Вт·с (кВт·ч)	Температура нагрева обмотки, °С
$s = 1,0$ (0 мин^{-1})	18	$0,5 \cdot 10^5$ (0,014)	41,3
$s = 1,2$ ($-5,24 \text{ мин}^{-1}$)	21,6 (3,6+18)	$0,6 \cdot 10^5$ (0,017)	41,5
$s = 1,4$ ($-10,48 \text{ мин}^{-1}$)	25,2 (7,2+18)	$0,7 \cdot 10^5$ (0,019)	41,8
$s = 1,6$ ($-15,72 \text{ мин}^{-1}$)	28,8 (10,8+18)	$0,8 \cdot 10^5$ (0,022)	42
$s = 1,8$ ($-20,96 \text{ мин}^{-1}$)	32,4 (14,4+18)	$0,9 \cdot 10^5$ (0,025)	42,3
$s = 2,0$ ($-25,76 \text{ мин}^{-1}$)	36 (18+18)	$1,0 \cdot 10^5$ (0,028)	42,5

Применение частотного останова с помощью преобразователя существенно снизить потери электроэнергии в процессе пуска, и соответственно нагрев электродвигателя.

2.6 Анализ потерь электроэнергии в электроприводе АВО газа при различных способах пуска

Вследствие протекания по его обмоткам пускового тока при прямом пуске асинхронных электродвигателей на номинальном напряжении происходит интенсивный нагрев электродвигателя

К нагреванию двигателя приводят потери мощности в электродвигателе. В статье рассматривается построение модели с помощью, которой производится оценка потерь мощности в асинхронном двигателе в процессе его пуска. С помощью данной модели производится сравнение потерь мощности в электродвигателе ВАСО16-14-24 для следующих случаев комбинированного пуска электропривода АВО газа:

- «прямой пуск из состояния покоя»;
- «торможение противовключением - прямой пуск»;
- «частотный пуск из состояния покоя»;
- «плавный останов электродвигателя при авторотации – частотный пуск»;
- «динамическое торможение электродвигателя при авторотации – частотный пуск».

Для нахождения и сравнения величины потерь мощности в перечисленных пяти случаях используются модели нерегулируемого и регулируемого электропривода АВО газа детально описанные в [12, 40, 41]. Критерием сравнения является величина потерь мощности в электродвигателе в пусковом режиме.

Расчётные потери мощности для номинального режима работы электродвигателя ВАСО16-14-24 представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Расчётные потери мощности в АД.

Величина	Значение, Вт	Значение в % от расчетной суммы потерь
Потери в обмотке статора, $\Delta P_{\text{эл.1 ном.}}$	3183,732	64,31
Потери в обмотке ротора, $\Delta P_{\text{эл.2 ном.}}$	593,844	12
Потери в стали, $\Delta P_{\text{ст.}}$	900,282	18,19
Механические потери, $\Delta P_{\text{мех. ном.}}$	247,506	5
Добавочные потери, $\Delta P_{\text{доб. ном.}}$	24,75	0,5
Сумма расчетных потерь $\Delta P_{\text{ном.}}$	4950,114	100
Потери по каталожному КПД, $\Delta P_{\text{ном.}}$	4950,113	99,99

Потери мощности при прямом пуске электродвигателя при номинальном напряжении из состояния покоя и при наличии обратной скорости вращения (случай 1 и 2) исследуются на модели нерегулируемого электропривода, дополненной блоком для вычисления потерь мощности. Модель нерегулируемого электропривода представлена на рисунке 2.24.

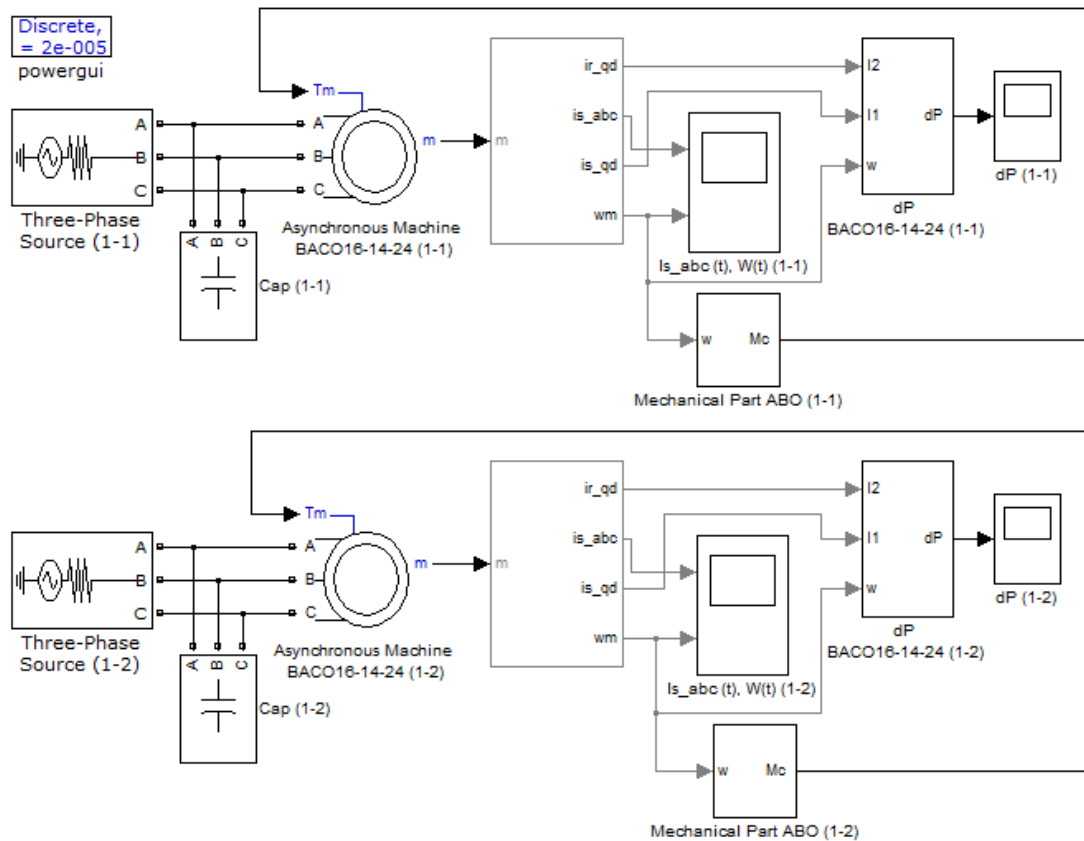


Рисунок 2.24 – Модель нерегулируемого электропривода АВО газа

Блоки Three-Phase Source, Cap, Asynchronous Machine BACO16-14-24, Mechanical Part ABO аналогичны описанным в [12, 40, 41]. Отличие

заключается в дополнении указанной модели блоком для оценки потерь мощности в электродвигателе dP ВАСО16-14-24. Рассмотрим подробнее указанный блок.

Суммарная мощность потерь в АД в переходных и установившихся режимах при нерегулируемом электроприводе определяется по формуле:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{эл.1 ном.}} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1 \text{ ном.}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{ст.ном.}} + \Delta P_{\text{эл.2 ном.}} \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2 \text{ ном.}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{мех.ном.}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном.}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{доб.ном.}} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1 \text{ ном.}}} \right)^2 \quad (2.44)$$

Переходные процессы (осциллограммы токов статора и угловой скорости) при прямом пуске вентилятора АВО газа из состояния покоя и при наличии обратной скорости вращения $s = 1,2$ представлены на рисунках 2.25 и 2.26.

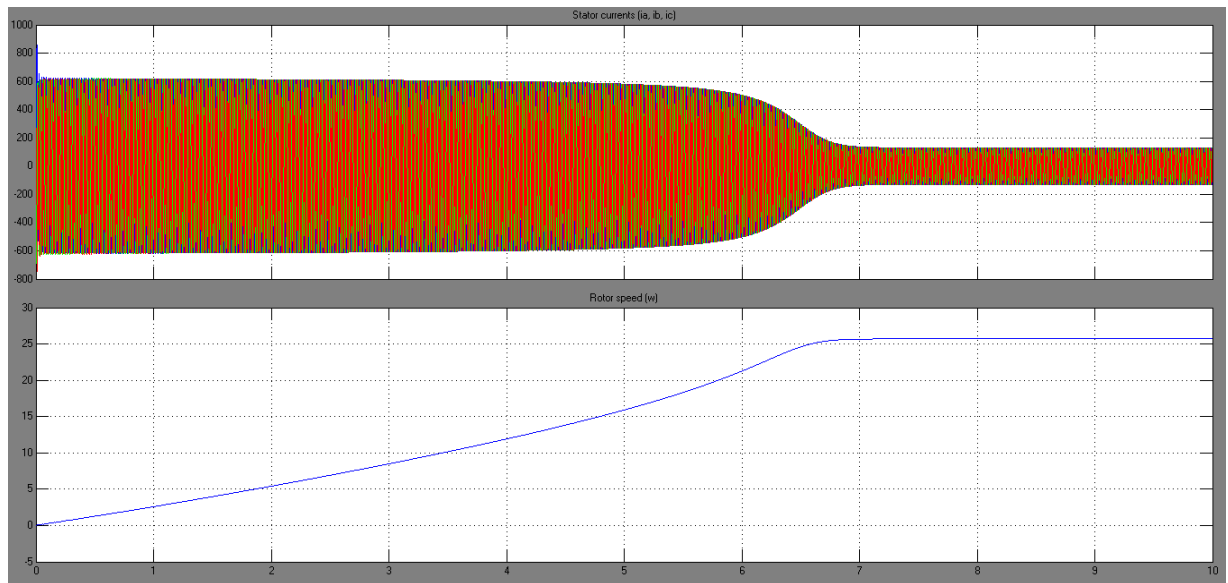


Рисунок 2.25 – Осциллограммы переходных процессов при прямом пуске вентилятора АВО газа из состояния покоя

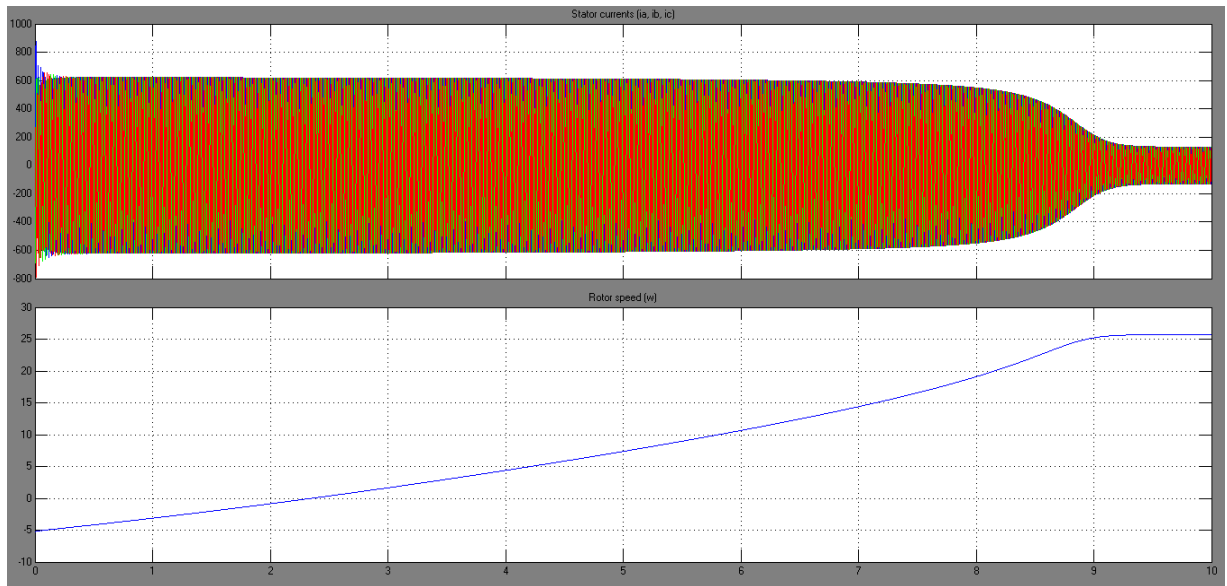


Рисунок 2.26 – Графики переходных процессов при прямом пуске вентилятора АВО газа при скорости авторотации $s = 1,2$

На графиках видно, что при наличии обратной авторотации $s = 1,2$ увеличивается время прямого пуска при номинальном напряжении, с 7 до 9,5 секунд по сравнению с прямым пуском из состояния покоя.

На рисунке 2.27 показаны графики потерь мощности в электродвигателе при прямом пуске при номинальном напряжении из состояния покоя и при авторотации со скоростью $s = 1,2$.

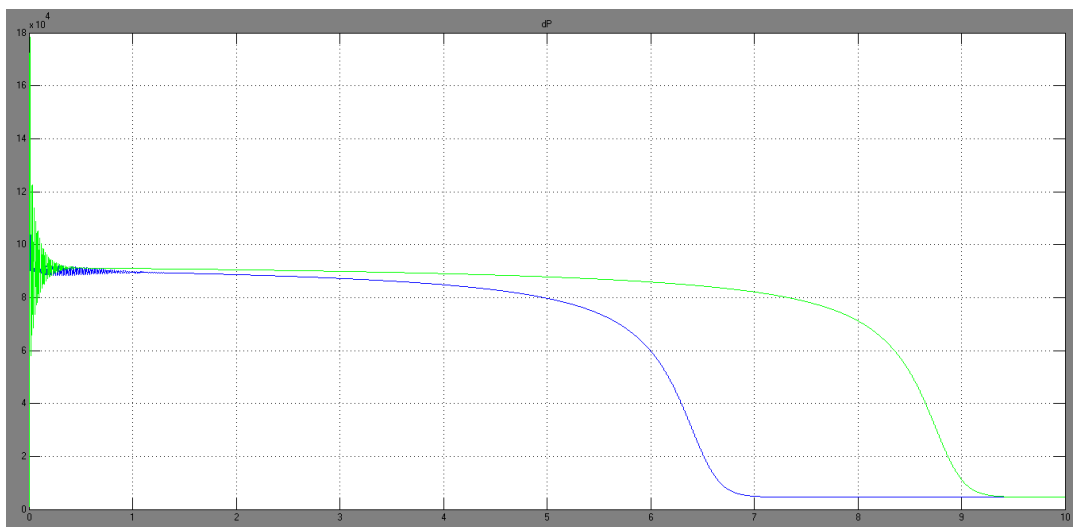


Рисунок 2.27 – Осциллограмма потерь мощности при прямом пуске из состояния покоя и при наличии обратного вращения $s = 1,2$

Потери мощности при частотном пуске электродвигателя из состояния покоя и потери мощности при применении плавного останова электродвигателя с помощью ПЧ при скорости авторотации $s=1,2$ с последующим частотным пуском исследуются на модели электропривода, дополненной блоком для вычисления потерь мощности. Модель частотно-регулируемого электропривода представлена на рисунке 2.27 [11, 41, 42].

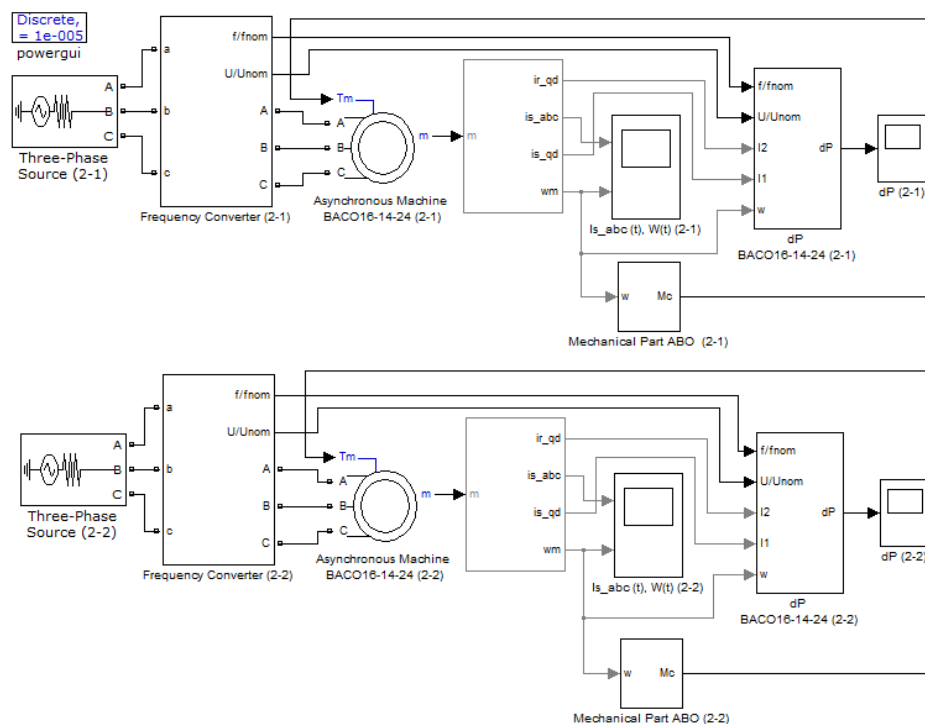


Рисунок 2.27 – Модель частотно-регулируемого ЭП АВО газа

Блок вычисления потерь мощности в АД при частотном регулировании скорости вращения имеет одно отличие от соответствующего блока для нерегулируемого электропривода, заключающееся в том, что при частотном регулировании потери в стали не остаются постоянными, как это принято для нерегулируемого электропривода.

Суммарная мощность потерь в АД в переходных и установившихся режимах при частотном регулировании скорости вращения определяется по формуле:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{эл.1 ном.}} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1 \text{ ном.}}}\right)^2 + \Delta P_{\text{ст. ном.}} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1 \text{ ном.}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1 \text{ ном.}}}\right)^3 + \Delta P_{\text{эл.2 ном.}} \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2 \text{ ном.}}}\right)^2 + \Delta P_{\text{мех. ном.}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном.}}}\right)^2 + \Delta P_{\text{доб. ном.}} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1 \text{ ном.}}}\right)^2 \quad (2.45)$$

Переходные процессы (осциллограммы токов статора и угловой скорости) при частотном пуске вентилятора АВО газа из состояния покоя (случай 3) представлены на рисунке 2.28.

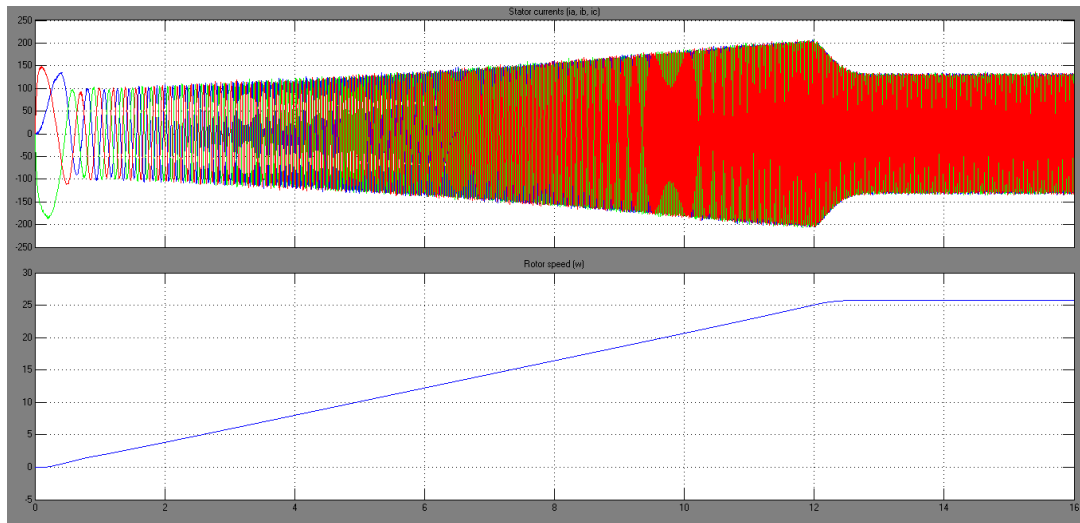


Рисунок 2.28 – Осциллограммы переходных процессов при частотном пуске вентилятора АВО газа из состояния покоя

Согласно эксплуатационной документации АВО газа рабочее колесо вентилятора в момент пуска не допускается вращение рабочего колеса в обратную сторону [5, 20]. В связи с этим предлагается при авторотации со скольжением $s = 1,2$ плавно остановить вентилятор с помощью ПЧ и далее производить частотный пуск вентилятора. Для пояснения на рисунке 2.29 представлены осциллограммы изменения частоты и амплитуды напряжения в относительных единицах в процессе плавной остановки и последующего частотного пуска.

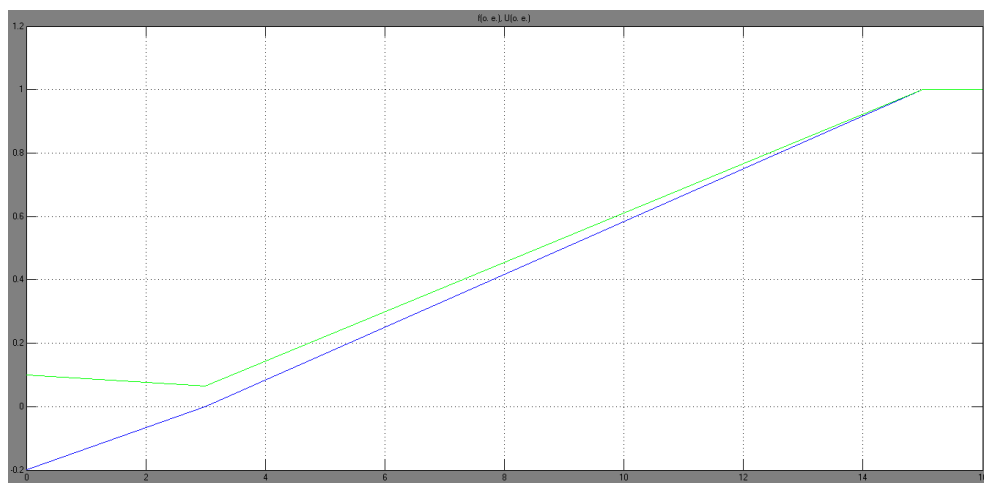


Рисунок 2.29 – Осциллограммы изменения частоты и амплитуды напряжения в относительных единицах

Плавная остановка электродвигателя происходит на отрезке времени от 0 до 3 секунды, частота питающего напряжения изменяется от минус 0,2 до 0 в относительных единицах. Знак «минус» означает, что направление вращения ротора на этом отрезке времени противоположно вращению в нормальном режиме работы (обратное вращение вентилятора). В момент времени 3 секунды производится частотный пуск вентилятора.

На рисунке 2.30 показаны осциллограммы переходных процессов при применении плавного останова электродвигателя вентилятора АВО газа при авторотации со скольжением $s=1,2$ и последующим частотным пуске.

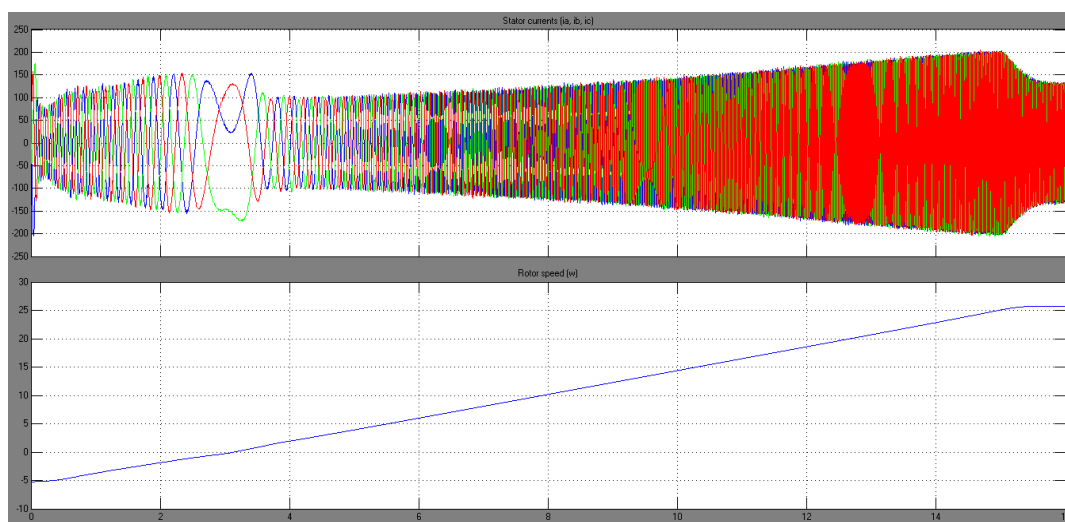


Рисунок 2.30 – Осциллограммы переходных процессов при частотном пуске вентилятора АВО газа при авторотации со скольжением $s = 1,2$

Из представленных осциллограмм видно, что при авторотации со скольжением $s = 1,2$ увеличивается время запуска с 13 до 16 секунд по сравнению с частотным пуском из состояния покоя, это связано с тем, что первые 3 секунды электродвигатель плавно останавливается с помощью ПЧ [11].

На рисунке 2.31 показаны осциллограммы потерь мощности в АД при частотном пуске из состояния покоя и при применении плавного останова с помощью ПЧ с последующим частотным пуском при авторотации со скольжением $s = 1,2$ [11].

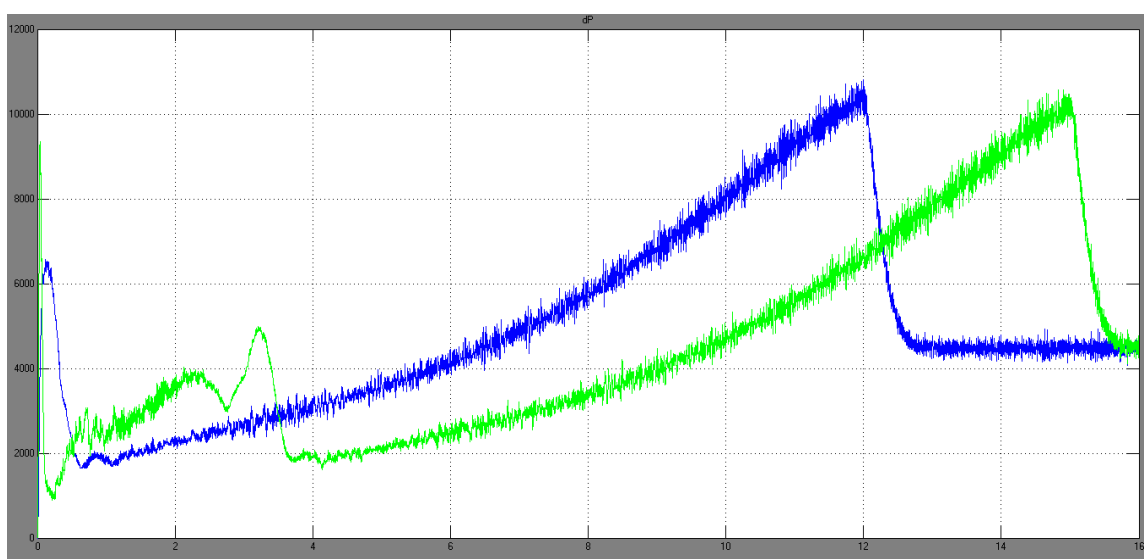


Рисунок 2.31 – Осциллограммы потерь мощности при частотном пуске из состояния покоя и при авторотации со скольжением $s = 1,2$

С помощью ПЧ можно применить комбинированный пуск «динамическое торможение – частотный пуск». На рисунке 2.32 представлена модель преобразователя частоты с реализацией динамического торможения. Динамическое торможение осуществляется путем подключения двух фаз обмотки статора к выпрямителю ПЧ через тормозной резистор R_{din_torm} силовыми ключами «+» и «-», при этом все ключи инвертора закрыты. Диаграмма состояния ключей представлена на рисунке 2.33.

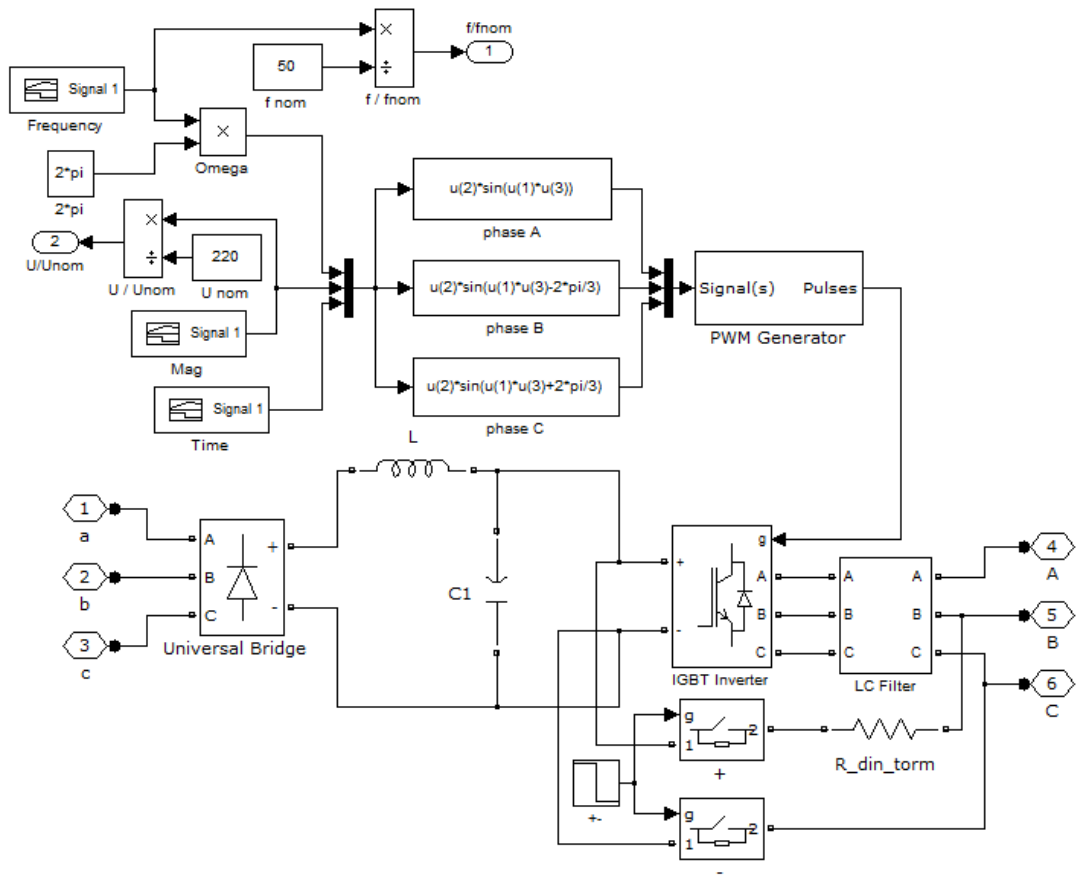


Рисунок 2.32 – Модель ПЧ с реализацией динамического торможения

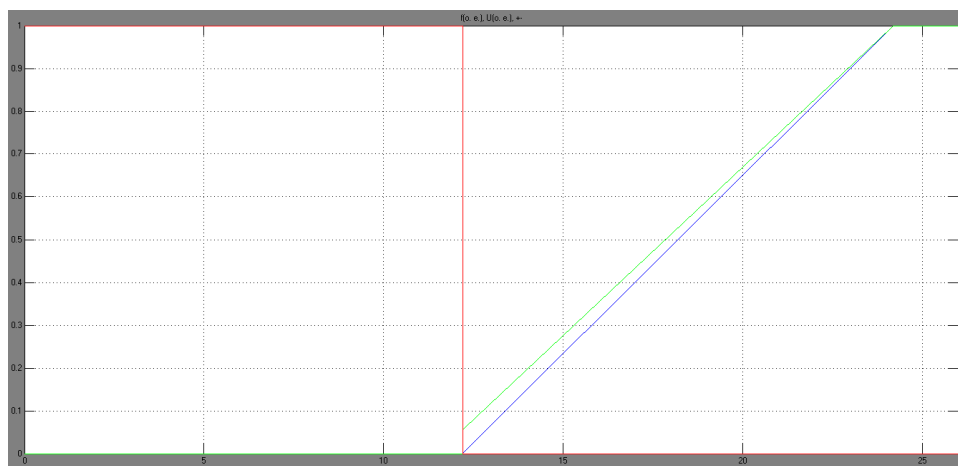


Рисунок 2.33 – Диаграмма состояния ключей

На отрезке времени 0 – 12 с. двигатель отключён от ПЧ т.к. все ключи инвертора закрыты, а ключи «+» и «-» открыты и две фазы обмотки статора подключены к выпрямителю через тормозной резистор. В момент времени 12 с. (ротор заторможен и больше не имеет обратного вращения) ключи «+» и

«-» закрываются, и производится частотный пуск из состояния покоя, аналогично описанному выше случаю.

На рисунке 2.34 показаны осциллограммы переходных процессов при применении динамического торможения электродвигателя вентилятора АВО газа при авторотации со скольжением $s=1,2$ с последующим частотным пуском.

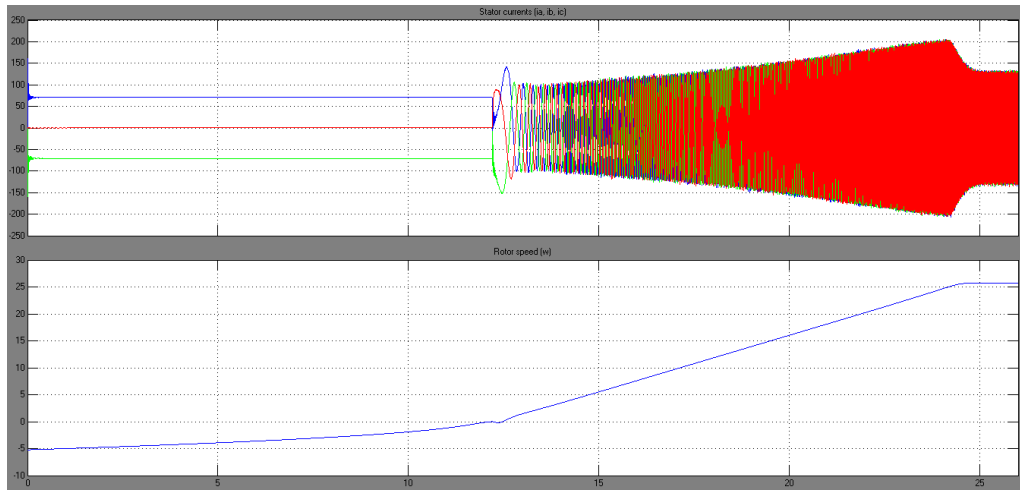


Рисунок 2.34 – Осциллограммы переходных процессов (ток и скорость) при динамическом торможении вентилятора АВО газа при наличии обратного вращения $s = 1,2$ с последующим частотным пуском

Из представленных осциллограмм видно, что при применении динамического торможения время запуска увеличивается до 25 секунд, в связи с тем, что первые 12 секунд электродвигатель находится в режиме динамического торможения.

На рисунке 2.35 показаны осциллограммы потерь мощности в АД при динамическом торможении и последующим частотным пуском при авторотации со скольжением $s = 1,2$.

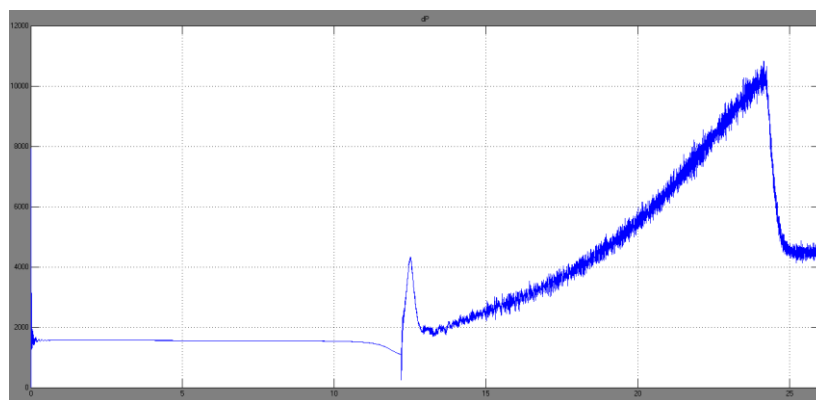


Рисунок 2.35 – Осциллограммы потерь мощности при динамическом торможении вентилятора АВО газа при наличии обратного вращения $s = 1,2$ и последующим частотном пуске

Результаты моделирования при начальных скольжениях $s=1.2$ для различных способов комбинированного пуска сведены в таблицу 2.13.

Таблица 2.13 – Сводная таблица результатов моделирования пусков.

Способ пуска		s=1,0	s=1,2	s=1,4	s=1,6	s=1,8	s=2,0
Торможение противовключением – прямой пуск	Время пуска, t, с	11	15,5	24	пуск невозможен	пуск невозможен	пуск невозможен
	Потери мощности, ΔP , Вт	$5,6 \cdot 10^5$	$8,4 \cdot 10^5$	$13,3 \cdot 10^5$			
	Перегрев обмотки, τ , °С	14,2	21	33,8			
Динамическое торможение – прямой пуск	Время пуска, t, с	-	19	31	пуск невозможен	пуск невозможен	пуск невозможен
	Потери мощности, ΔP , Вт		$6,0 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^5$			
	Перегрев обмотки, τ , °С		15	14,8			
Динамическое торможение – плавный пуск	Время пуска, t, с	-	41,5	53,5	пуск невозможен	пуск невозможен	пуск невозможен
	Потери мощности, ΔP , Вт		$6,3 \cdot 10^5$	$6,1 \cdot 10^5$			
	Перегрев обмотки, τ , °С		16	15,5			

Способ пуска		s=1,0	s=1,2	s=1,4	s=1,6	s=1,8	s=2,0
Динамическое торможение – частотный пуск	Время пуска, t, с	-	27 (8+19)	49,5 (30,5+19)	пуск невозможен	пуск невозможен	пуск невозможен
	Потери мощности, ΔP , Вт		$0,7 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$			
	Перегрев обмотки, τ , °C		2	3			
Частотное торможение – частотный пуск	Время пуска, t, с	-	22,6 (3,6+19)	26,2 (7,2+19)	29,8 (10,8+19)	33,4 (14,4+19)	37,4 (18+19)
	Потери мощности, ΔP , Вт		$0,6 \cdot 10^5$	$0,7 \cdot 10^5$	$0,8 \cdot 10^5$	$0,9 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$
	Перегрев обмотки, τ , °C		2	2	2	2	3

Результаты моделирования показывают, что пуску вентилятора, имеющего обратное вращение, сопутствует увеличение потерь электроэнергии и времени запуска. Применение плавного останова с помощью ПЧ по сравнению с использованием динамического торможения примерно равноценно с точки зрения величины потерь электроэнергии, но является более эффективным с точки зрения времени пуска электродвигателя (время пуска увеличивается с 16 с. при использовании плавного останова до 25 с. по сравнению с применением динамического торможения).

Для реализации: динамического торможения необходимо дополнительно тормозной резистор и автоматические выключатели для подключения выпрямителя ПЧ к обмоткам статора. Динамическое торможение не управляемое, так как выпрямитель в составе ПЧ, как правило, неуправляемый. Сложнее регулирование, ниже надежность.

Для частотного торможения достаточно только наличие функции «подхвата» в ПЧ с последующим плавным снижением частоты питающего напряжения до нуля.

Таким образом, наиболее эффективным способом исключения пуска АД в режиме противовключения является частотное торможение с последующим частотным пуском.

Выводы по главе 2

1. Показано, что пуск вентилятора АВО газа в режиме авторотации приводит к режиму противовключения электродвигателя, что существенно увеличивает время разгона, увеличивает тепловой износ изоляции и приводит к досрочной выработке ресурса электродвигателя. При скоростях авторотации больше критического значения момент, развиваемый электродвигателем недостаточен для преодоления момента сопротивления. Это приводит к длительному протеканию пускового тока по обмоткам статора и ротора и отключению двигателя защитами, либо отказам.

2. 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.

3. Для реализации динамического торможения необходимо применение тормозного резистора и коммутационных аппаратов для подключения выпрямителя ПЧ к обмоткам статора. Наличие дополнительных электротехнических элементов снижает надёжность устройства в целом. Регулирование динамического торможения является сложным процессом вследствие того, что выпрямитель в составе ПЧ, как правило, неуправляемый. Установлено, что для частотного торможения достаточно только наличие функции «подхвата» в ПЧ с последующим плавным снижением частоты питающего напряжения до нуля.

4. Частотно-регулируемый электропривод АВО газа позволяет уменьшить потери электроэнергии в электродвигателе в пусковых режимах, останавливать рабочее колесо вращения в режиме авторотации и производить пуск вентилятора в соответствии с требованиями эксплуатационной документации.

5. Показано, что при применении частотно-регулируемого электропривода обеспечивается пуск АВО газа при любых скоростях авторотации.

6. На основе анализа способов комбинированного пуска 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 по измеряемому наводимому в обмотке статора ЭДС, плавно снижается частота до нулевого значения с последующим частотным пуском. Разработанный способ позволяет обеспечить пуск в широком диапазоне скоростей авторотации при минимуме потерь мощности и износе изоляции

Глава 3 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ЭНЕРГО-РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ АВО ГАЗА В СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

3.1 Температурные преобразования в охлаждающей секции АВО газа

Для оптимального управления электроприводом АВО газа важно знать происходящие аэродинамические и тепловые процессы в АВО газа и их зависимость от частоты вращения вентиляторов в зависимости от места вентилятора в охлаждающей секции [101 – 107].

Основным параметром, характеризующим эффективность охлаждения газа в установках воздушного охлаждения, является тепловой коэффициент полезного действия (КПД) АВО, определяемый выражением [108]:

$$\eta = \frac{(T_{\text{вх.}} - T_{\text{вых.}})}{(T_{\text{вх.}} - T_0)} \quad (3.1)$$

где $T_{\text{вх.}}$ – температура газа на входе в АВО, °С; $T_{\text{вых.}}$ – температура газа на выходе из АВО, °С; T_0 – температура охлаждающего воздуха, °С.

Физически тепловой КПД представляет собой отношение фактического количества теплоты, отбираемого у газа в результате теплообмена, к максимально возможному при котором газ примет температуру охлаждающего воздуха [109]. Теплообменная способность АВО газа характеризуется паспортной тепловой характеристикой, представляющей зависимость разности температур газа на входе и выходе АВО от разницы температуры газа на входе и температуры охлаждающего воздуха [109].

На рисунке 3.1 представлена паспортная тепловая характеристика АВО типа 2АВГ-75С состоящая из семейства лучей, зависящих от расхода газа G через теплообменный пучок. Штриховой линией обозначены линии тепловой производительности, определяющие количество теплоты Q , отбираемое у газа в определённой рабочей точке. Тепловой КПД на графике тепловых

характеристик представляет собой тангенс угла наклона луча тепловой характеристики при заданном массовом расходе газа [109].

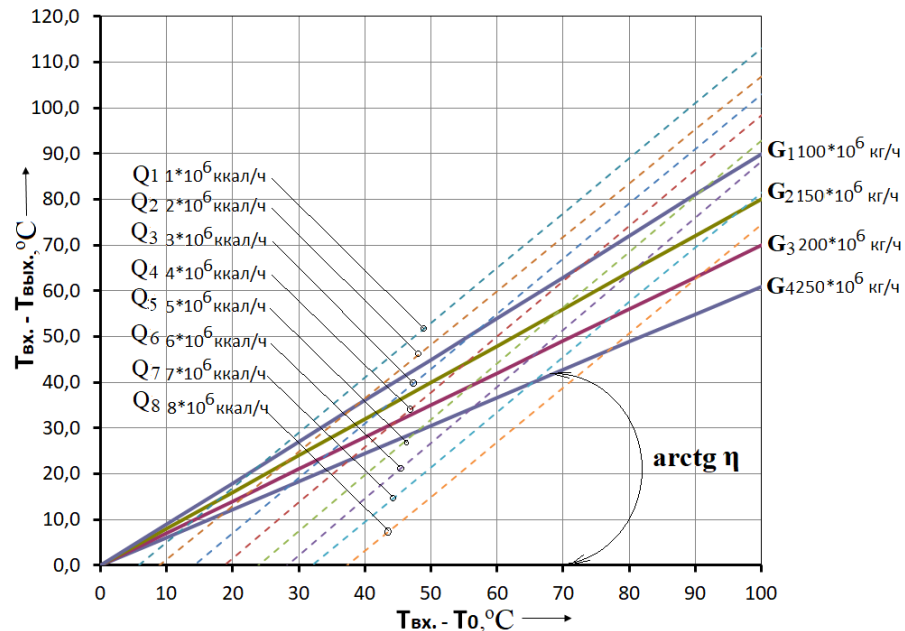


Рисунок 3.1 – Паспортная тепловая характеристика аппарата 2АВГ-75С

Для расчёта номинального теплового КПД при заданном массовом расходе газа необходимо найти аппроксимацию функции одной переменной данной зависимости. Получаем кубическую регрессию:

$$\eta = 0,1907 \cdot g^3 - 0,9099 \cdot g^2 + 1,1633 \cdot g + 0,4210 \quad (3.2)$$

где g – массовый расход охлаждаемого газа, 10^6 т/ч.

Тепловой КПД не может превышать значения 1 и угол наклона характеристики не может быть более 45° , т.к. равенство степени охлаждения единице означает отбор тепла от газа в таком количестве, что температура газа становится равной температуре охлаждающего воздуха.

На основании выражения (3.1) и графика тепловой характеристики можно выявить факторов, определяющих тепловой КПД:

1) массовый расход газа в единицу времени, который в свою очередь зависит от производительности ГПА и от количества включенных в работу секций. Производительность ГПА – режимный параметр, изменение которого производится на основе диспетчерского управления всего добывающего комплекса. Количество включенных секций изменяется

оперативно дежурным персоналом на основе анализа параметров работы УАВО. Количественная оценка влияния расхода газа по секции определяется по паспортной тепловой характеристике.

2) температура охлаждающего воздуха как охлаждающего агента. Как видно из выражения (3.1) тепловой КПД зависит от температуры воздуха гиперболически.

3) теплоотбор, в свою очередь зависящий от расхода охлаждающего воздуха.

В случае использования дискретного способа регулирования температуры газа на выходе УАВО температура газа для конкретного технологического режима и температуры охлаждающего воздуха на выходе секции АВО возможен определённый набор температур газа. Для 2 АВО газа секции, т.к. 4 вентиляторах имеем 24 комбинации включенных/отключенных вентиляторов и 12 температур газа на выходе секции. По условию допустимости температуры на выходе пригодными могут быть лишь несколько вариантов, также ограничением выбора режима является условие по недопущению ЛГО в зимний период, согласно которому более глубокое охлаждение необходимо производить в первом по ходу газа АВО (тогда как работа последнего вентилятора нежелательна). Отсюда вытекает один из главных недостатков дискретного управления: температура газа на выходе из секции может принимать дискретные значения согласно тепловым характеристикам, а поиск необходимой комбинации включённых вентиляторов является задачей эксплуатирующего персонала, основанной на опытно-интуитивном подходе.

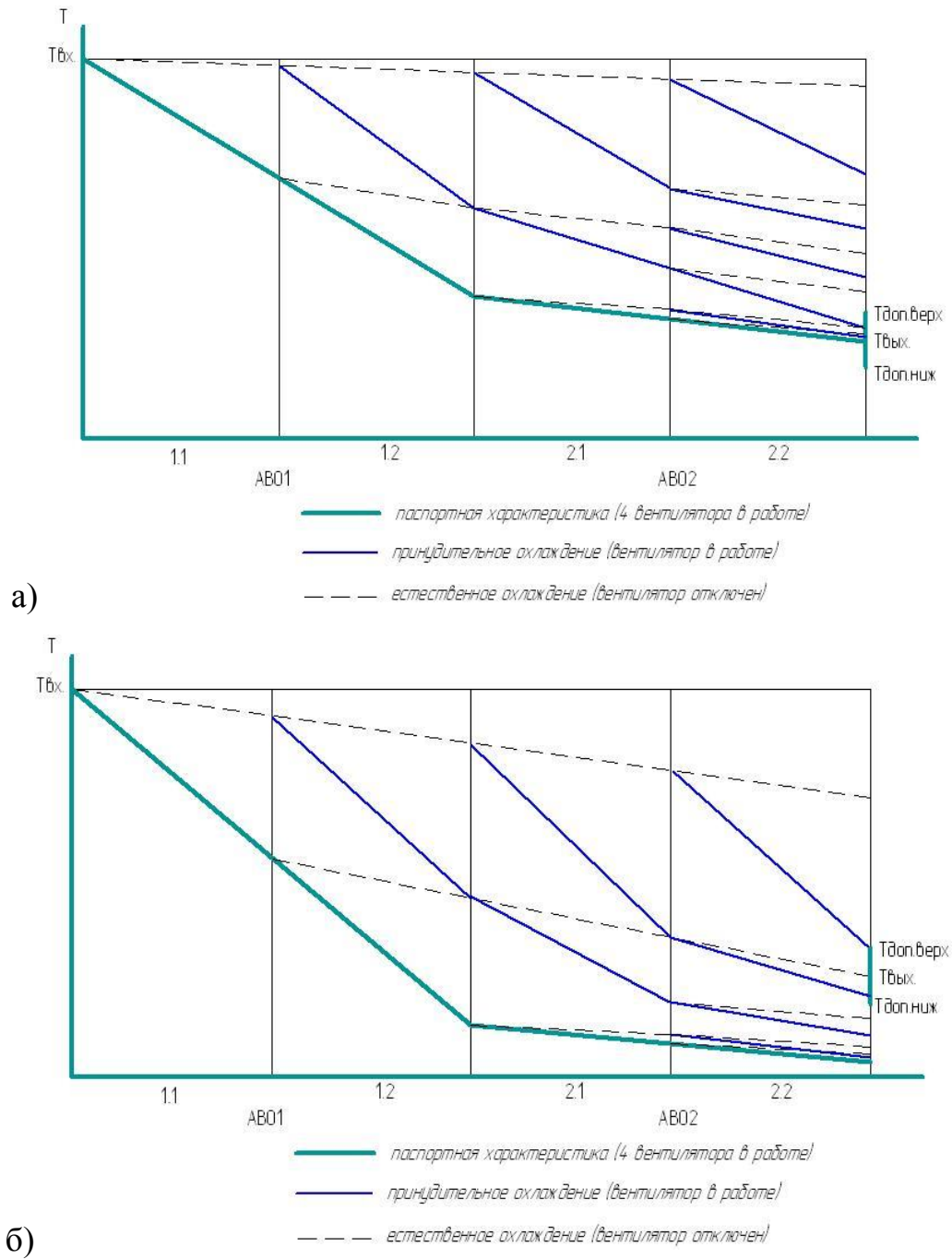


Рисунок 3.2 – Температурное распределение вдоль секции: а) в летнее время, б) в зимнее время

В качестве примера, на рисунке 3.3 изображен график распределения температуры вдоль секции при дискретном управлении УАВО при различных комбинациях, построенная на основе наблюдений на ДКС-5 ООО «Газпром добыча Ямбург». Измерение температуры производилось в контрольных точках – местах установки термопреобразователей: на входе в секцию, выходе из аппарата АВО1 и выходе из секции (обозначено: $T_{вх.}$,

$T_{\text{ВЫХ.1}}$, $T_{\text{ВЫХ.2}}$). В средней части теплообменников (между вентиляторами одного АВО) термопреобразователи отсутствуют. Температура на данном участке принимается: а) как среднее между температурами входа и выхода при работе обоих вентиляторов; б) с учётом эффективности АВО при отключенных вентиляторах (естественное охлаждение), составляющей $2/9$ от эффективности принудительного охлаждения двумя работающими вентиляторами [102, 103].

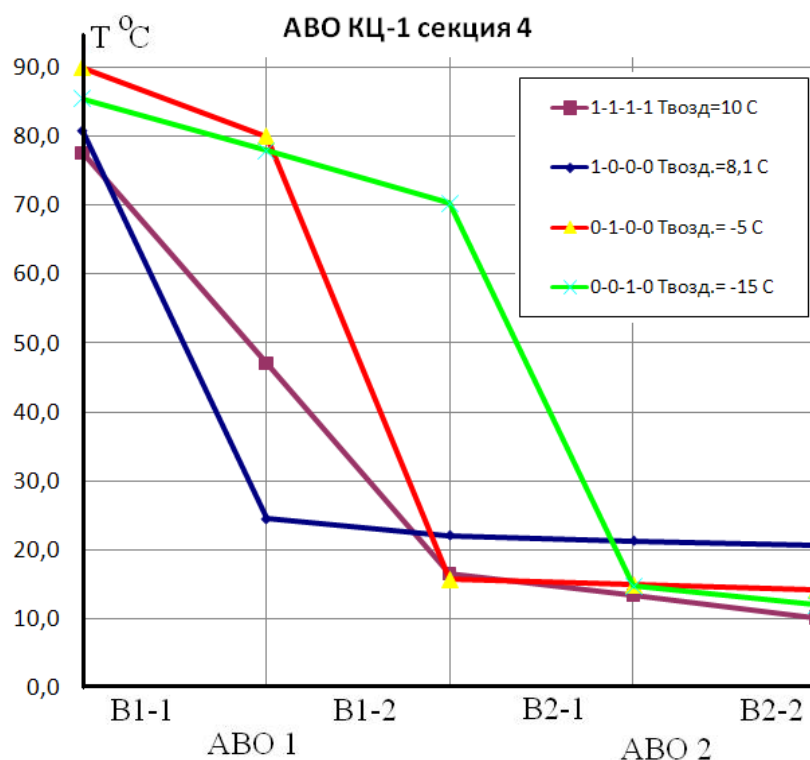


Рисунок 3.3 – Распределение температуры газа вдоль секции при различных вариантах включенных вентиляторов (в подписи рядов указано:

«1» – вентилятор включен, «0» – вентилятор отключен)

Следует отметить существенное влияние естественного (конвекционного) охлаждения при отключенном вентиляторе. Так в варианте «0-0-1-0» в АВО1 происходит охлаждение с тепловым КПД равным 0,15. Данное значение на практике находится в диапазоне 0,15-0,4.

Рассмотрим вариант работы «1-1-1-1» («летний» режим - все вентиляторы в работе). Как видно из рисунка 2.10, наибольший теплоотбор имеет место в АВО1, в силу большой разницы между температурой газа на

входе и температурой охлаждающего воздуха. В этом случае АВО2 из-за малой разницы вышеназванных температур обеспечивает гораздо меньший теплоотбор (отрезок АВО2 имеет пологий характер). Так в данном варианте $\eta_1=0,9$ и $\eta_2=0,09$, что говорит о существенном снижении эффективности охлаждения в АВО2 [102, 103].

Неравномерность охлаждения свидетельствует о низкой эффективности дискретного способа регулирования, т.к. теплообменники АВО с отключенными вентиляторами имеют низкую тепловую нагрузку. Также высокая степень охлаждения при работающих вентиляторах АВО повышает риск ЛГО в теплообменниках в зимний период, т.к. чем выше тепловой КПД, тем интенсивней теплоотбор от газа [102, 103].

3.2 Регулирование температуры на выходе АВО газа изменением расхода охлаждающего воздуха

Специфика технологии охлаждения газа предполагает постоянное изменение расхода охлаждающего воздуха, нагнетаемого на теплообменные секции АВО.

Существуют следующие способы регулирования расхода воздуха:

1) Дискретное регулирование отключением/включением электродвигателей. В данном варианте количество воздуха, проходящего через теплообменники, изменятся дискретно и, как следствие, также дискретно изменяется количество отбираемой у газа теплоты.

2) Сезонное регулирование угла атаки лопастей вентилятора. Вследствие нецелесообразности использования технических средств дистанционного регулирования угла атаки регулирование производится сезонно: летом – максимально возможный угол согласно условию ограничения, потребляемого двигателем тока, зимой – минимальный угол по условию снижения риска ЛГО. Аэродинамическая характеристика на графике Q-H поворачивается по часовой стрелке при уменьшении угла атаки

(выставлении «зимнего» угла), против часовой стрелки при увеличении угла атаки (выставлении «летнего» угла).

3) Регулирование эффективного сечения металлическими жалюзями. При введении в сеть дополнительного сопротивления кривая сети и дополнительного сопротивления передвигается влево на графике Q-H. влево перемещается и рабочая точка вентилятора, соответственно понижается создаваемая им подача. В данном варианте достигается плавность регулирования, однако способ имеет низкую энергетическую эффективность.

4) Частотное регулирование электроприводом АВО. Способ основан на регулировании частоты питающего электродвигатель напряжения. При частотном регулировании аэродинамическая характеристика «сползает» вниз вдоль кривой равных КПД (характеристики сети).

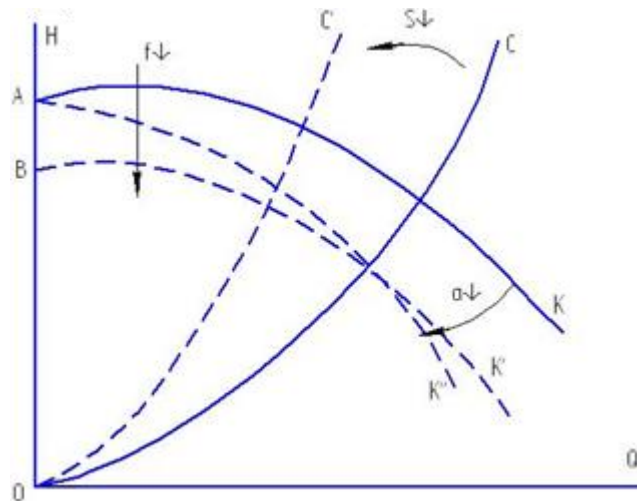


Рисунок 3.4 – Аэродинамические характеристики осевого вентилятора в зависимости от способа регулирования

На рисунке показано: $S \downarrow$ - уменьшение эффективного сечения регулированием жалюзи; $\alpha \downarrow$ - изменение угла атаки лопастей; $f \downarrow$ - изменение графика при частотном регулировании (регулирование «вниз»)

В аэромеханике различают три возможных варианта регулировки режимов вентилятора [45, 46]:

- по производительности при постоянной депрессии;
- по депрессии при постоянной производительности;

– при одновременном изменении производительности и депрессии.

Депрессией вентилятора называется разность статических давлений в воздушном потоке на входе в вентилятор и выходе из него [45, 46].

На практике в основном применяется оперативное регулирование, осуществляемое изменением как производительности, так и депрессии при котором основным параметром регулирования является поток воздуха [45, 46].

Регулирование расхода воздуха сопровождается соответствующим изменением количества отбираемой теплоты в теплообменниках. Данное обстоятельство находит своё отображение в тепловой характеристике смены рабочей точки, что показано на рисунке 3.5. В паспортном варианте температурный напор $(T_1' - T_0')$ определяет разность $(T_1' - T_2')$ и количество отбираемого тепла Q' , т.е. температуру на выходе. Снижение теплоотбора смещает рабочую точку к началу координат и, как следствие, уменьшение разности $(T_1' - T_2')$.

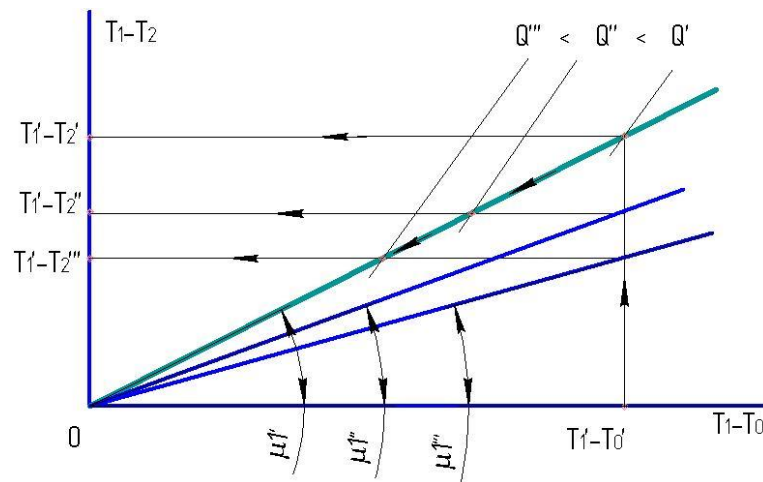


Рисунок 3.5 – Тепловая характеристика АВО при регулировании расхода воздуха

При дискретном регулировании – отключении одного вентилятора происходит снижение теплоотбора в 2 раза:

$$Q_{\text{др}}^{**} = Q^*/2 \quad (3.2)$$

При частотном регулировании рабочая точка смещается на тепловой характеристике в зависимости от частоты согласно следующей зависимости :

$$Q_{\text{чр}}^{**} = Q(f) \equiv f^{0,8} \quad (3.3)$$

Также при регулировании эффективного сечения при помощи жалюзи место рабочей точки определяется расходом воздуха

$$Q_{\text{жр}}^{**} \equiv q^{0,8} \quad (3.4)$$

где q – расход воздуха

При регулировании угла атаки лопастей рабочая точка смещается дискретно согласно шагу изменения угла атаки.

3.3 Особенности регулирования температуры на выходе секции АВО с двухступенчатым охлаждением

Конструктивно установки охлаждения «сырого» газа с температурой выше 40 °С на объектах добычи газа в соответствии с [5] выполняются по двухступенчатой схеме охлаждения, представленной на рисунке 3.6.

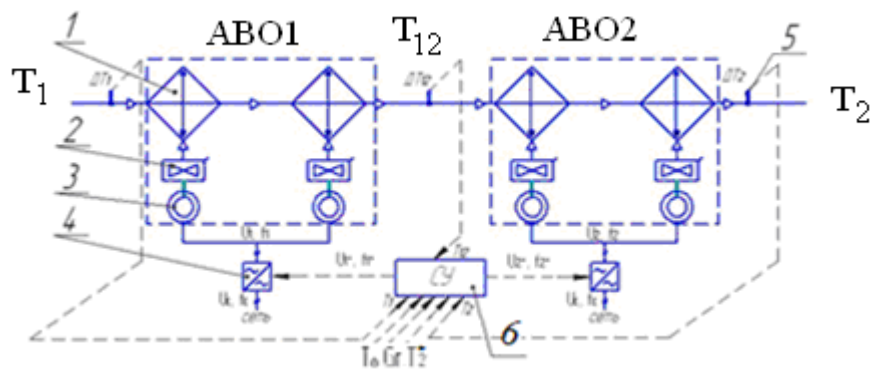


Рисунок 3.6 – Технологическая схема секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением

1 – теплообменная секция АВО, 2 – осевой вентилятор, 3 – электродвигатель, 4 – преобразователь частоты, 5 – датчик температуры, 6 – система управления.

Задача регулирования температуры на выходе из секции АВО газа заключается в нахождении необходимых взаимозависимых тепловых КПД каждого из двух последовательно включенных АВО. Взаимозависимость тепловых КПД обусловлена тем, что температура газа на выходе АВО1 является температурой газа на входе в АВО2. Обозначим данную температуру как T_{12} .

В целях иллюстрации вышеизложенного необходимо построить эпюры распределения температуры при частотно-регулируемом электроприводе [102, 103].

Рассматривается режим «1-1-1-1» («летний» - 4 вентилятора в работе). Построение эпюры распределения температуры производится для варианта регулирования вентиляторов АВО1, вентиляторы АВО2 работают в номинальном режиме. Частота для электроприводов вентиляторов АВО1 выбирается одинаковой в целях минимизации «ветровых» полей над аппаратом.

Начальные условия: $T_1=77,5^\circ\text{C}$, $T_0=10^\circ\text{C}$; $G = 100000$ кг/ч

Таблица 3.1 – Расчёт по варианту частотного регулирования электродвигателей В1-1, В1-2 АВО1

T_{12} , °C	T_2 , °C	Мощность теплоотбора АВО1 Q_1 без регулирования, ккал/ч	Мощность теплоотбора АВО1 Q_1 при ЧР, ккал/ч	Мощность теплоотбора АВО2 Q_2 без регулирования, ккал/ч	f_1 , Гц	η_1	η_2
16,5	10,1	3,8	3,8	0,5	50,00	0,90	0,09
27,5	11,5	3,8	3	0,9	37,21	0,74	0,24
37,5	11,5	3,8	2,5	1,5	29,63	0,59	0,39
44,5	12,5	3,8	2	2	22,41	0,49	0,47

На основе расчётных данных построен график распределения температуры, представленная на рисунке 3.7.

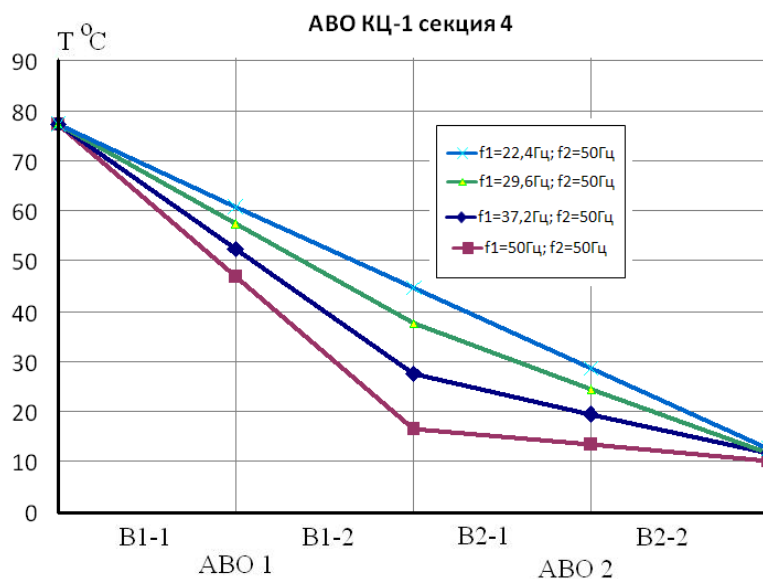


Рисунок 3.7 – График распределения температуры газа вдоль секции при частотном регулировании АВО1

Как видно из таблицы при регулировании производительности вентиляторов АВО1 имеет место выравнивание степени охлаждения, соответственно, и тепловой загрузки. Рисунок 3.7 показывает, что глубокое регулирование в АВО1 при номинальном режиме АВО2 не приводит к недопустимому повышению температуры на выходе из АВО2 (из секции). Так согласно технологическому регламенту на эксплуатацию газового промысла температура на выходе из УАВО КЦ1 находится 20-25 °С. Вследствие выравнивания тепловой загрузки, температура на выходе из секции изменяется плавно в пределах допустимых значений, что говорит об эффективности способа. А снижение частоты питаемого напряжения влечёт за собой снижение потребляемой электродвигателями мощности.

3.4 Вывод уравнения тепловой КПД секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением

Анализ существующих способов регулирования температуры газа на установках АВО, приведённых в [9, 18, 21 – 24], показывает, что в данных способах не учитываются свойства и технологические особенности двухступенчатых секций АВО газа. Двухступенчатые системы охлаждения с

точки зрения регулирования температуры газа на выходе имеют существенные отличия, т. к. выходная температура газа первого АВО (АВО1 на рисунке 2) одновременно является входной для второго (АВО2 на рисунке 2) [109].

В предлагаемом способе управления предусматривается работа вентиляторов одного АВО газа с одинаковой скоростью вращения для уменьшения взаимного аэродинамического взаимовлияния. Паспортная тепловая характеристика АВО приводится для двух одновременно работающих на номинальных параметрах при номинальной скорости вращения. При этом, в случае работы только одного из двух АВО, необходимо учитывать охлаждение участков теплообменников, находящихся над отключенным вентилятором, что усложняет расчёт режима. При использовании ЧРП и работе всех электродвигателей секции отсутствует необходимость в дополнительных расчётах конвекционного охлаждения участков теплообменников, отключенного АВО [109]. Схемотехнически это возможно реализовать подключением электродвигателей каждого из АВО к своему преобразователю частоты. Работа АВО1 и АВО2 с разными частотами позволяет подойти к регулированию секции с точки зрения снижения энергозатрат, т. к. при допустимой по технологическому режиму температуре газа на выходе из секции температура газа между двумя АВО может варьироваться в зависимости от частоты вращения вентиляторов [109 – 117]. Электрически связанные между собой электроприводы, при работе которых поддерживается заданное соотношение их скоростей называется согласно ГОСТ Р 50369-92 «Электроприводы. Термины и определения» взаимосвязанным электроприводом.

Необходимо проанализировать влияние частоты вращения электроприводов АВО1 и АВО2 на тепловой КПД и потребляемую мощность. Исходными данными являются: температура газа на входе и выходе секции, массовый расход газа, температура охлаждающего воздуха [109].

В соответствии с (3.1) тепловой КПД АВО1:

$$\eta_1 = \frac{(T_1 - T_{12})}{(T_1 - T_0)} \quad (3.5)$$

где T_1 – температура газа на входе в АВО1 (входе в секцию), °С;
 T_{12} – температура газа на выходе АВО1 (температура газа между АВО1 и АВО2), °С;

Тепловой КПД АВО2:

$$\eta_2 = \frac{(T_{12} - T_2)}{(T_{12} - T_0)} \quad (3.6)$$

где T_2 – температура газа на выходе из АВО2 (выходе из секции), °С.

Из выражений (3.5) и (3.6) следует, что

$$T_{12} = T_1 - \eta_1 \cdot (T_1 - T_0) \quad (3.7)$$

$$T_{12} = \frac{(T_2 - \eta_2 \cdot T_0)}{(1 - \eta_2)} \quad (3.8)$$

Приравняем (3.7) и (3.8)

$$T_1 - \eta_1 \cdot (T_1 - T_0) = \frac{(T_2 - \eta_2 \cdot T_0)}{(1 - \eta_2)} \quad (3.9)$$

Решим (3.9) относительно η_1 и преобразуем полученное уравнение с учетом (3.6). Получим:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{T_1 \cdot (1 - \eta_2) - (T_2 - \eta_2 \cdot T_0)}{(1 - \eta_2) \cdot (T_1 - T_0)} = \frac{T_1 - T_1 \cdot \eta_2 - T_2 + \eta_2 \cdot T_0}{(1 - \eta_2) \cdot (T_1 - T_0)} = \\ &= \frac{(T_1 - T_2) - \eta_2 \cdot (T_1 - T_0)}{(1 - \eta_2) \cdot (T_1 - T_0)} = \frac{(T_1 - T_2)}{(1 - \eta_2) \cdot (T_1 - T_0)} - \eta_2 = \\ &= \frac{\eta_c}{1 - \eta_2} - \eta_2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Откуда общий тепловой КПД секции из двух АВО равен

$$\eta_c = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (3.11)$$

Уравнение теплового КПД секции необходимо для нахождения оптимальных значений тепловых КПД каждого из АВО в целях определения параметров работы ЧРП в вопросе снижения энергетических затрат.

3.5 Разработка способа оптимального управления и методики определения параметров оптимального управления ЧРП секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением

Задача снижения энергетических затрат на охлаждение газа состоит в уменьшении потребляемой мощности частотно-регулируемыми электроприводами одной секции двухступенчатого охлаждения.

Суммарная потребляемая мощность ЧРП секции охлаждения с учётом кубической зависимости потребляемой мощности от частоты питания электродвигателя [101, 117, 118, 119, 120] равна:

$$P_{\Sigma} = \sum_1^n P_i = \sum_1^n \left(P_{\text{ном.}} \cdot \left(\frac{f_i}{f_c} \right)^3 \right) \quad (3.12)$$

где $P_{\text{ном.}}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт; f_i – частота i -го ЧРП, Гц; f_c – номинальная частота сети, Гц.

При питании электродвигателей АВО1 частотой f_1 , электродвигателей АВО2 частотой f_2 выражение (3.12) приводится к виду:

$$P_{\Sigma} = 2 \cdot P_{\text{ном.}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_c} \right)^3 + 2 \cdot P_{\text{ном.}} \cdot \left(\frac{f_2}{f_c} \right)^3 \quad (3.13)$$

Для повышения энергетической эффективности необходимо оптимизировать частоту вращения каждого из АВО, путем выбора частоты питания электроприводов каждой из групп на основе следующей функции оптимизации [117, 118, 119, 120]:

$$P_{\Sigma} = 2 \cdot P_{\text{ном.}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_c} \right)^3 + 2 \cdot P_{\text{ном.}} \cdot \left(\frac{f_2}{f_c} \right)^3 \quad (3.14)$$

Критерием оптимизации является

$$P_{\Sigma} \rightarrow \min \quad (3.15)$$

Режим движения охлаждающего воздуха, нагнетаемого вентилятором, определяется числом Рейнольдса [108]:

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad (3.16)$$

где w – скорость движения воздуха;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

l – характерный размер канала или обтекаемой стенки.

Явление теплоотдачи в теплообменной секции характеризуется числом Нуссельта (Nu), характеризующим соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности [108]:

$$Nu = \frac{q_k}{q_T} \quad (3.16)$$

где q_k – тепловой поток за счёт конвекции;

q_T – тепловой поток за счёт теплопроводности.

В свою очередь число Нуссельта является функцией числа Рейнольдса. Для турбулентного режима характерного для АВО газа зависимость выглядит как [108]

$$Nu \equiv (Re)^{0,8} \quad (3.17)$$

Таким образом, количество теплоты, отбираемое от охлаждаемого газа, зависит от скорости потока воздуха и производительности вентилятора, а, следовательно, и от частоты питания электродвигателей в степени 0,8 [109].

Тепловой КПД зависит от скорости вращения вентиляторов АВО, в степени 0,8 [108]:

$$\left(\frac{\eta}{\eta_{ном.}}\right) = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном.}}\right)^{0,8} = \left(\frac{f}{f_c}\right)^{0,8} \quad (3.18)$$

$$\left(\frac{f}{f_c}\right) = \left(\frac{\eta}{\eta_{ном.}}\right)^{1,25} \quad (3.19)$$

Подставляя из (3.19) в (3.14) получим

$$P_{\Sigma} = 2 \cdot P_{ном.} \cdot \left(\left(\frac{\eta_1}{\eta_{ном.}}\right)^{3,75} + \left(\frac{\eta_2}{\eta_{ном.}}\right)^{3,75} \right) \rightarrow \min \quad (3.20)$$

При постоянстве $P_{ном.}$ и $\eta_{ном.}$ при принятых условиях в выражении (3.20) решение поиска оптимальных тепловых КПД сводится к нахождению минимума следующей целевой функции, которую обозначим как ψ [120]:

$$\psi = \eta_1^{3,75} + \eta_2^{3,75} \quad (3.21)$$

Преобразуем выражение (3.21) к функции одной переменной. С учетом выражения (3.11) для теплового КПД секции выражение (3.21) принимает вид:

$$\psi = \eta_1^{3,75} + \left(\frac{\eta_c - \eta_1}{1 - \eta_1} \right)^{3,75} \quad (3.22)$$

Исследуем данную целевую функцию.

Область определения функции. Так как в функции одно из слагаемых представляет собой дробь, нужно найти нули знаменателя:

$$1 - \eta_1 = 0 \Rightarrow \eta_1 = 1 \quad (3.23)$$

Данная линия является вертикальной асимптотой. Исключаем единственную точку $\eta_1 = 1$ из области определения функции. Как было указано ранее физически тепловой КПД не может быть больше значения 1 и ограничена значением теплового КПД секции. Область определения функции:

$$D(\psi) = [0; \eta_c] \quad (3.24)$$

График функции пересекает ось ординат при $\eta_1 = 0$:

$$0^{3,75} + \left(\frac{\eta_c - 0}{1 - 0} \right)^{3,75} = \eta_c^{3,75} \quad (3.25)$$

Получаем точку $(0; \eta_c^{3,75})$.

Построим график функции.

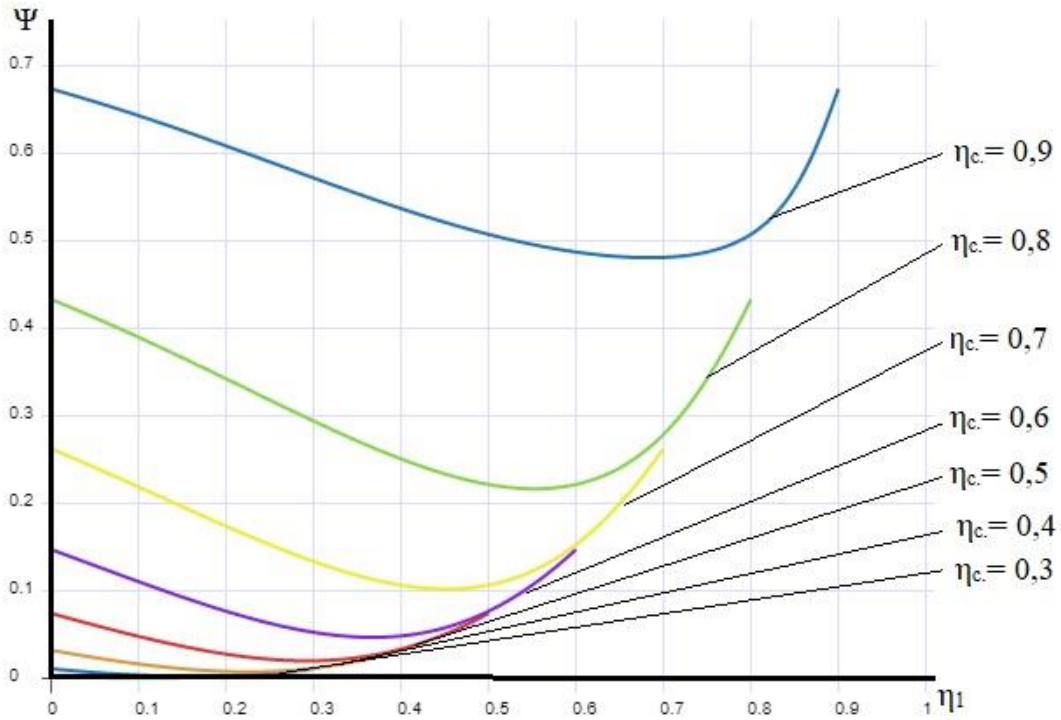


Рисунок 3.8 – Графики целевой функции в зависимости от заданного значения теплового КПД охлаждающей секции

Исследуем функцию на экстремумы и монотонность. Для этого найдем первую производную функции. В целях локального поиска оптимальных параметров необходимо отыскать экстремум функции ψ и приравнять нулю. При заданных значениях температуры на входе и выходе секции теплового КПД секции η_c будет величиной постоянной. Приравнивая производную ψ по η_1 нулю, получаем [109]

$$\frac{d\psi}{d\eta_1} = 0 \quad (3.26)$$

$$\frac{d\psi}{d\eta_1} = 3,75 \cdot \eta_1^{2,75} - 3,75 \cdot \left(\frac{\eta_c - \eta_1}{1 - \eta_1}\right)^{2,75} \cdot \frac{1 - \eta_c}{(1 - \eta_1)^2} = 0 \quad (3.27)$$

$$\eta_1^{2,75} - \frac{(\eta_c - \eta_1)^{2,75}}{(1 - \eta_1)^{4,75}} \cdot (1 - \eta_c) = 0 \quad (3.28)$$

Решением уравнения (3.28) является оптимальный тепловой КПД АВО1. Оптимальный тепловой КПД АВО2 определяется по (3.11).

Оптимальные частоты питания электродвигателей вычисляются по выражениям:

$$\begin{cases} \frac{f_1}{f_c} = \left(\frac{\eta_1}{\eta_{\text{НОМ.}}}\right)^{1,25} \\ \frac{f_2}{f_c} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_{\text{НОМ.}}}\right)^{1,25} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_1 = f_c \cdot \left(\frac{\eta_1}{\eta_{\text{НОМ.}}}\right)^{1,25} \\ f_2 = f_c \cdot \left(\frac{\eta_2}{\eta_{\text{НОМ.}}}\right)^{1,25} \end{cases} \quad (3.29)$$

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

На рисунке 3.9 изображена обобщённая структурная схема электропривода и взаимосвязанных элементов согласно [120].

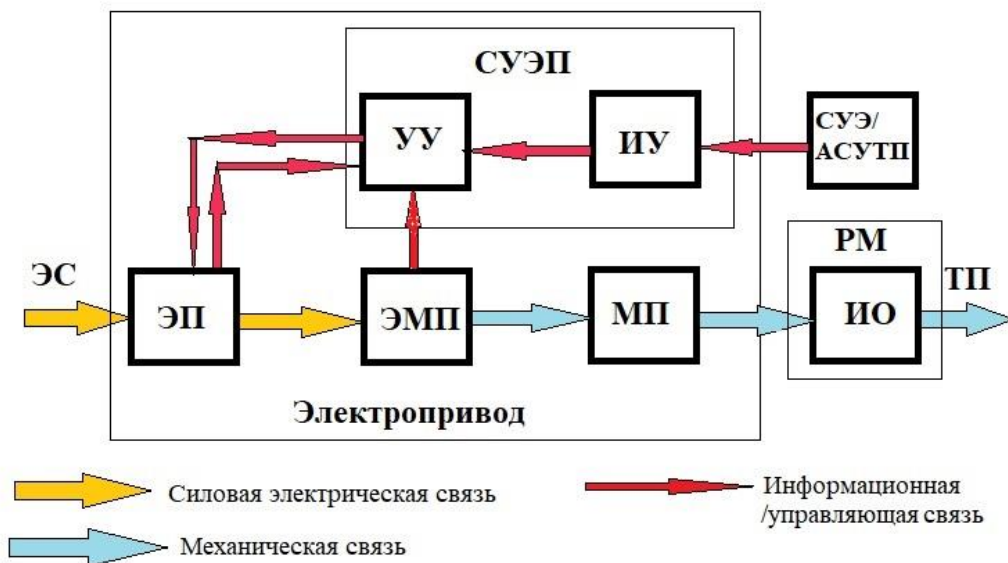


Рисунок 3.9 – Структурная схема электропривода

На рисунке обозначены: ЭС – электрическая сеть; ЭП – электрический преобразователь; ЭМП – электромеханический преобразователь; МП – механический преобразователь; ИО – исполнительный орган; РМ – рабочая машина; ТП – технологический процесс; УУ – управляющее устройство; ИУ – информационное устройство; СУЭП – система управления электропривода; СУЭ – система управления электроприводом; АСУ ТП – автоматизированная системы управления технологическим процессом

При предлагаемом способе управления ЭТК охлаждающей секции представляет собой электрически связанные между собой электроприводы, при работе которых поддерживается заданное соотношение их скоростей. В

соответствии с [120] данная структура электропривода имеет определение – «взаимосвязанный электропривод».

При реализации способа управления, при котором к одному преобразователю частоты подключены два электродвигателя одного АВО структурная схема взаимосвязанного электропривода примет вид, представленный на рисунке 3.10. Вследствие того, что в вентиляторах АВО газа отсутствуют промежуточные механизмы в схеме исключён механический преобразователь.

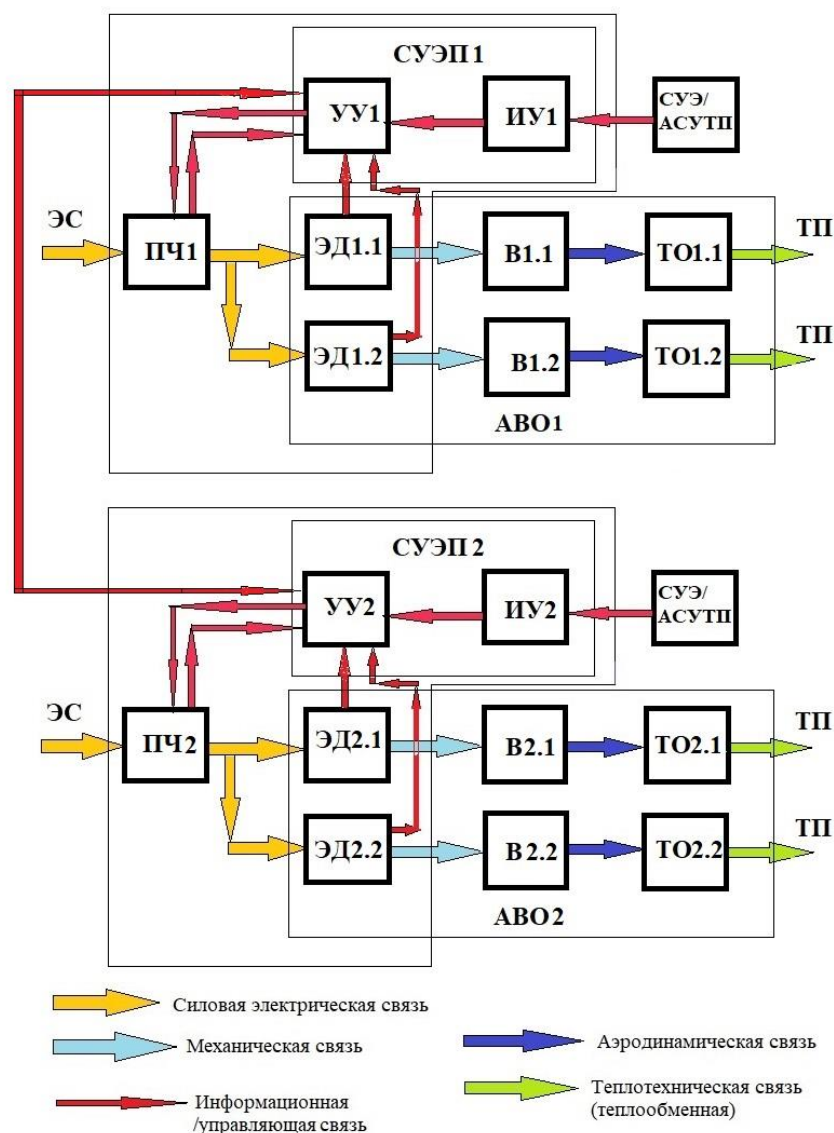


Рисунок 3.10 – Структурная схема взаимосвязанного электропривода АВО газа

На рисунке обозначены: ЭС – электрическая сеть; АВО1, АВО2 – первый и второй по ходу газа аппараты воздушного охлаждения газа одной охлаждающей секции; ПЧ1, ПЧ2 – преобразователи частоты электроприводов вентиляторов АВО1, АВО2; ЭД1, ЭД2 – электродвигатели АВО1, АВО2; В1, В2 – вентиляторы АВО1, АВО2; ТП – технологический процесс; УУ1, УУ2 – управляющие устройства электроприводов вентиляторов АВО1, АВО2; ИУ1, ИУ2 – информационные устройства электроприводов вентиляторов АВО1, АВО2; СУЭП1, СУЭП2 – системы управления электроприводов вентиляторов АВО1, АВО2; СУЭ – система управления электроприводами; АСУ ТП – автоматизированная системы управления технологическим процессом

На основе предложенной методики определения оптимальных частот вращения электроприводов АВО газа при двухступенчатом охлаждении предложен оптимизационный алгоритм, реализованный в программной среде Mathcad и зарегистрированной как программа для ЭВМ [119, 120, 123]. Листинг программы приведён в приложении В.

Исходными данными для расчёта являются: технические характеристики аппарата воздушного охлаждения газа, температура охлаждающей среды, и технологические параметры газопровода: температура газа на входе и выходе из АВО газа, расход охлаждаемого газа, физические параметры перекачиваемого газа [123]. Структурная схема оптимизационного алгоритма приведена на рисунке 3.11.

Данный алгоритм реализуется в управляющем устройстве систем управления электроприводов АВО1 и АВО2.

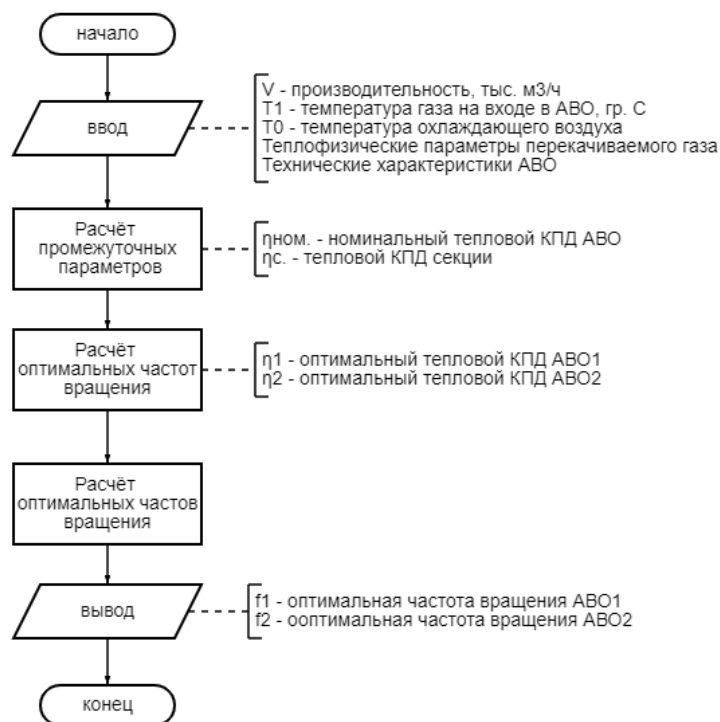


Рисунок 3.11 – Структурная схема оптимизационного алгоритма

Выводы по главе 3

1. Получено уравнение теплового КПД секции двухступенчатого охлаждения газа на основе анализа тепловых характеристик АВО.

2. Разработана методика расчёта оптимальных параметров работы частотно-регулируемого электропривода для секции с двухступенчатым охлаждением газа и алгоритм управления, основанные на тепловых характеристиках теплообменников.

3. Предложены методика и целевая функция оптимального управления ЧРП АВО газа для заданных технологических параметров газового промысла по критерию минимума потребляемой мощности. На основе приведённой методики вычисления оптимальной частоты вращения электроприводов АВО газа при двухступенчатом охлаждении предложен алгоритм, реализованный в зарегистрированной программе для ЭВМ.

ГЛАВА 4 ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОРЕСУРСΟΣБЕРЕЖЕНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ РЕЖИМОВ

4.1 Снижение теплового износа обмоток статора при использовании функции подхвата ЧРП при пуске в режиме авторотации

Применяемые для АВО газа асинхронные электродвигатели предназначены для продолжительного режима работы. В данном режиме время прямого пуска электродвигателя несравнимо меньше по сравнению с временем работы электродвигателя в номинальном режиме. Однако, потери мощности и электроэнергии в режиме прямого пуска существенно выше потерь мощности в номинальном режиме. Поэтому для снижения нагрева обмотки статора при пуске в режиме авторотации вентилятора предлагается использовать частотно-регулируемый электропривод с реализацией комбинированного пуска основанного на частотных методах [11, 12, 51, 79, 87, 91].

Отказы асинхронных электродвигателей из-за повреждения изоляции составляют до 45-55% [34, 36, 37, 38] отказов. При этом надёжность изоляции обмотки статора асинхронного двигателя в значительной степени определяет общую надёжность электродвигателя. Основным фактором, влияющим на срок службы изоляции электродвигателей, являются температура обмотки, и как следствие, тепловое старение изоляции [124].

Все изоляционные и пропиточные материалы, каждого класса изоляции по нагревостойкости имеют определённый номинальный уровень температуры, превышение которого всего на несколько градусов приводит к существенному сокращению срока службы изоляции [66 – 80]. В связи с этим необходимо уделять особое внимание влиянию на срок службы изоляции режима работы асинхронного двигателя [124].

Срок службы изоляции $\tau_{с.и.}$, определяется по выражению [36, 37, 38, 57]:

$$\tau_{с.и.} = T_0 \cdot 2^{-\frac{\Theta}{\Delta\Theta}} \quad (4.1)$$

где Θ – температура изоляции, °С;

$\Delta\Theta$ – коэффициент, зависящий от типа изоляции;

T_0 – условный срок службы изоляции ($6,225 \cdot 10^4$ года при $\Theta = 0$ °С).

На практике обычно используют относительным износом изоляции F , который представляет собой величину, обратную относительному сроку службы [72]:

$$F = 2^{(\Theta - \Theta_H)/\Delta\Theta} \quad (4.2)$$

где Θ_H – предельно допустимая температура изоляции, °С;

Относительный износ изоляции F показывает, во сколько раз износ изоляции при данной температуре обмотки Θ больше (меньше) износа при предельно допустимой температуре за одинаковое время работы.

Если известна функция относительного износа изоляции, то износ изоляции L за время t определяется интегральным выражением [72]:

$$L = \int_0^t 2^{(\Theta - \Theta_H)/\Delta\Theta} \quad (4.3)$$

Решение уравнения (4.3) для разных условий работы и пуска электродвигателя рассмотрено в [57, 72, 73].

Для износа изоляции при пуске во время разгона электродвигателя [72]:

$$L = \frac{t_n}{\delta\Theta_n \cdot b \cdot e^{(\Theta_H - \Theta_{нач}) \cdot b}} \cdot (e^{\delta\Theta_n \cdot b} - 1) \quad (4.4)$$

$$\text{где } b = \ln 2 / \Delta\Theta \quad (4.5)$$

$\delta\Theta_n$ – превышение температуры обмотки в конце пуска Θ_n над начальным значением $\Theta_{нач}$ [72]:

$$\delta\Theta_n = \Theta_n - \Theta_{нач} = \Delta\Theta_n (k^2 - k_{нач}^2) \cdot \frac{t_n}{\tau} \quad (4.6)$$

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

$k_{\text{нач}}$ – кратность тока в начальном режиме (при пуске из неподвижного состояния $k_{\text{нач}} = 0$);

$t_{\text{п}}$ – длительность пуска, с,

τ – постоянная времени нагрева обмотки статора.

Формула (4.6) справедлива и для износа изоляции при торможении противовключением, если подставить в неё кратность тока при пуске в авторотации.

Основой тепловой модели является дифференциальное уравнение баланса тепловой энергии электрической машины и его численное решение, описывающее любые изменения тока [74]:

$$\Theta(t) = \Theta(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{\tau} \cdot \left(\frac{I^2}{I_{\text{НОМ}}^2} - \Theta(t-\Delta t) \right) \quad (4.7)$$

где $\Theta(t)$ – превышение температуры в момент времени t ;

I и $I_{\text{НОМ}}$ – текущий и номинальный ток электродвигателя соответственно.

В [76] приведена методика расчёта срока службы изоляции конкретного электродвигателя, если составлен график изменения тока. К определению расчётного срока службы изоляции применяется осреднённая по времени температура:

$$T = T_0 \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^{K \cdot (\Theta_{\text{ср}} - \Theta_H)} \quad (4.8)$$

где K – коэффициент пропорциональности,

$\Theta_{\text{ср}}$ – осреднённая по времени температура.

Рассмотрим задачу определения относительного уменьшения срока службы изоляции за время прямого пуска электродвигателя в режиме авторотации вентилятора по сравнению с пуском электродвигателя из состояния покоя, при различных скоростях авторотации.

Износ изоляции в течение времени t при изменяющейся температуре Θ , °C [57]:

$$\xi = \frac{1}{C} \int_0^t e^{b \cdot \Theta} dt \quad (4.9)$$

где C – нормативный срок службы изоляции,

b – коэффициент, учитывающий класс изоляции.

Для характеристики износа изоляции введём безразмерную величину $z = \xi \cdot C$, которая является относительным уменьшением срока службы изоляции. Пренебрегая теплоотдачей при кратковременных перегрузках относительное уменьшение срока службы изоляции за время нагрева током $I = k \cdot I_{\text{ном}}$, а в рассматриваемом случае пусковым током $I_{\text{пуск}} = k \cdot I_{\text{ном}}$ за время прямого пуска [57, 73]:

$$z = \frac{\tau^2 \cdot e^{b \cdot \Theta_H}}{b \cdot \Theta_{\text{нач}} \cdot (k^2 - 1) \cdot t_n} \cdot \left(4 \cdot e^{\frac{b \cdot \Theta_{\text{нач}} \cdot (k^2 - 1) \cdot t_n}{2 \cdot \tau}} + e^{\frac{b \cdot \Theta_{\text{нач}} \cdot (k^2 - 1) \cdot t_n}{\tau}} \cdot \left(1 + \frac{t_n}{\tau} \right) - 5 - \frac{t_n}{\tau} \right) \quad (4.10)$$

где τ – постоянная времени нагрева обмотки статора.

b – коэффициент, учитывающий класс изоляции.

Θ_H – предельно допустимая температура изоляции, °С;

t_n – длительность пуска, с,

k – кратность тока при пуске (или самозапуске);

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

Формула (4.10) позволяет оценить, как изменится относительное уменьшение срока службы изоляции при нагревании пусковым током за время прямого пуска относительно нагревания номинальным током за тоже время.

Определение уменьшения срока службы изоляции производится на ЭВМ с помощью программы, приведенной в [78]. Программа написана по методике вычисления износа изоляции, изложенной в [57, 72, 73]. Исходными данными являются время пуска, величина токовой перегрузки, допустимое превышение температуры, начальная температура, плотность тока в обмотке и кратность перегрузки [124].

Структурная схема математической модели оценки износа изоляции приведена на рисунке 4.1.

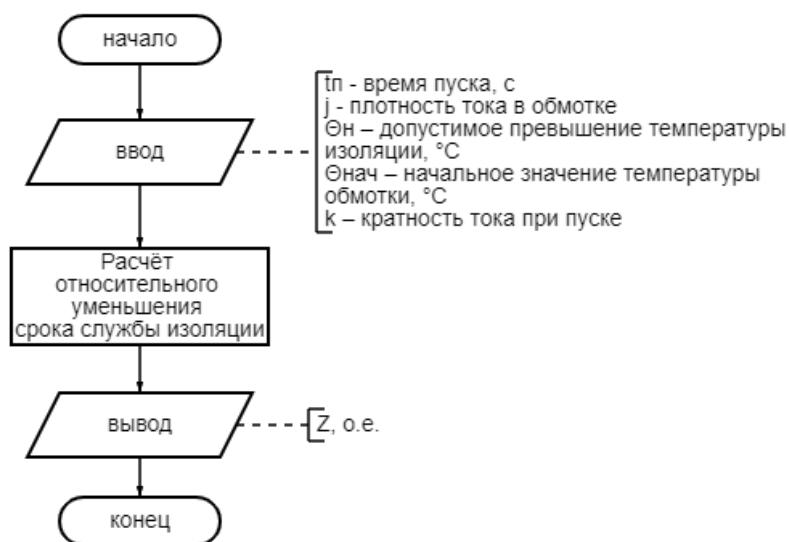


Рисунок 4.1 – Структурная схема математической модели оценки износа изоляции

Для расчёта необходимо учитывать влияние возможных отклонений напряжения от его номинального значения, т.к. вращающий момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату напряжения сети.

Результаты расчёта влияния времени пуска при разных значениях скорости авторотации и отклонениях напряжения представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Время пуска вентилятора

Начальное скольжение (начальная скорость вращения, рад/с)	Время пуска, с		
	Напряжение на выводах трансформатора		
	$0,95 \cdot U_{ном.}$	$U_{ном.}$	$1,05 \cdot U_{ном.}$
$s = 1,0 (0)$	11,7	10,2	9,0
$s = 1,1 (-2,62)$	13,7	12	10,5
$s = 1,2 (-5,24)$	16	13,8	12,2
$s = 1,3 (-7,86)$	18,7	16,5	14,5
$s = 1,4 (-10,48)$	23	19,5	17,2
$s = 1,5 (-13,1)$	30,2	25	21
$s = 1,6 (-15,72)$	запуск не возможен	запуск не возможен	30,5
$s = 1,7 (-18,34)$	запуск не возможен	запуск не возможен	запуск не возможен

Результаты расчётов показывают, что увеличение напряжения на выводах трансформатора приводит к уменьшению времени пуска. При напряжении на выводах трансформатора равном $0,95 \cdot U_{\text{ном}}$ и $U=U_{\text{ном}}$ максимальной скоростью вращения в режиме авторотации, при которой возможен прямой пуск при торможении противовключением, является скорость, соответствующая скольжению $s=1,5$. При увеличении скорости вращения в режиме авторотации момент, развиваемый электродвигателем при торможении противовключением, оказывается недостаточным для преодоления тормозного момента, создаваемого рециркулирующими потоками воздуха. При напряжении на выводах трансформатора равном $1,05 \cdot U_{\text{ном}}$ максимальная скорость обратного вращения, при которой возможен прямой пуск при торможении противовключением, увеличивается до значения, при которой скольжение $s=1,6$ [124].

Расчёты снижения относительного срока службы изоляции z , о.е. и увеличения износа изоляции по сравнению с пуском из состояния покоя Δz , % выполнены в программе Mathcad и представлены в таблице 4.2. За величину по отношению, к которой рассчитывалось изменение износа изоляции в процентах, принято значение z равное $37,53 \cdot 10^6$ при прямом пуске из состояния покоя при номинальном напряжении [124].

Таблица 4.2 – Результаты расчёта относительного износа изоляции.

Начальное скольжение (начальная скорость вращения, рад/с)	Напряжение на выводах трансформатора					
	$0,95 \cdot U_{\text{ном}}$		$U_{\text{ном}}$		$1,05 \cdot U_{\text{ном}}$	
	z , о.е.	Δz , %	z , о.е.	Δz , %	z , о.е.	Δz , %
$s = 1,0 (0)$	$37,74 \cdot 10^6$	0,56	$37,53 \cdot 10^6$	0	$37,36 \cdot 10^6$	-0,45
$s = 1,1 (-2,62)$	$38,03 \cdot 10^6$	1,33	$37,79 \cdot 10^6$	0,69	$37,57 \cdot 10^6$	0,11
$s = 1,2 (-5,24)$	$38,36 \cdot 10^6$	2,21	$38,04 \cdot 10^6$	1,36	$37,81 \cdot 10^6$	0,75
$s = 1,3 (-7,86)$	$38,75 \cdot 10^6$	3,25	$38,43 \cdot 10^6$	2,4	$38,14 \cdot 10^6$	1,63
$s = 1,4 (-10,48)$	$39,39 \cdot 10^6$	4,96	$38,87 \cdot 10^6$	3,57	$38,53 \cdot 10^6$	2,66
$s = 1,5 (-13,1)$	$40,50 \cdot 10^6$	7,91	$39,70 \cdot 10^6$	5,78	$39,09 \cdot 10^6$	4,16
$s = 1,6 (-15,72)$	-	-	-	-	$40,55 \cdot 10^6$	8,05

Начальное скольжение (начальная скорость вращения, рад/с)	Напряжение на выводах трансформатора					
	$0,95 \cdot U_{\text{ном.}}$		$U_{\text{ном.}}$		$1,05 \cdot U_{\text{ном.}}$	
	z, о.е.	$\Delta z, \%$	z, о.е.	$\Delta z, \%$	z, о.е.	$\Delta z, \%$
$s = 1,7 (-18,34)$	-	-	-	-	-	-

Результаты, представленные в таблице 4.2, показывают, что при пуске электродвигателя в режиме авторотации вентилятора, с ростом начальной скорости вращения рабочего колеса в обратном направлении, происходит увеличение относительного уменьшения срока службы изоляции, по сравнению с прямым пуском из состояния покоя. Поддержание на выводах трансформатора напряжения равного $1,05 \cdot U_{\text{ном}}$ даёт возможность снизить влияние перегрева за время прямого пуска по сравнению с пусками при напряжении равном $0,95 \cdot U_{\text{ном}}$ и $U_{\text{ном}}$.

Добиться снижения износа изоляции можно путем использования функции подхвата преобразователя частоты описанного в главе 2.

На основе модели разработанного в главе 2 комбинированного пуска «частотное торможение – частотный пуск» произведены расчёты износа изоляции при пуске электропривода с различными скоростями авторотации по отношению к пуску из состояния покоя.

Результаты расчета износа изоляции приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Время пуска и потери электроэнергии за время 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 Δz , %
$s = 1,0 (0)$	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)	$36,29 \cdot 10^{632}$	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

Данные, представленные в таблице 4.3, показывают, что применение ЧРП позволяет выполнить пуск вентилятора в режиме авторотации с любой возможной на практике скоростью. По результатам, приведённым в таблице 4.2, видно, что с ростом скорости авторотации возрастает значение относительного уменьшения срока службы изоляции z для нерегулируемого электропривода. Для ЧРП значение z практически не зависит от скорости авторотации. При этом снижение относительного срока службы изоляции ЧРП по сравнению с прямым пуском в режиме авторотации будет тем больше, чем больше остаточная скорость в режиме авторотации [124].

За величину z по отношению, к которой рассчитывалось изменение износа изоляции в процентах в таблице 4.3, принято значение z равное $37,53 \cdot 10^6$ при прямом пуске из состояния покоя при номинальном напряжении. Как видно из таблицы 4.3, значение z превышает 3%, и увеличивается при увеличении обратной скорости вращения, с которой производится прямой пуск электродвигателя [124].

4.2 Экономия электроэнергии использованием способа управления ЧРП при двухступенчатом охлаждении газа

Эффективность использования оптимальных частот вращения вентиляторов АВО газа, рассмотрим на примере АВО газа дожимной компрессорной станции для температур газа и воздуха: $T_1 = 88,8$ °С, $T_2 = 20,8$ °С, $T_0 = -5,0$ °С [109].

Результаты расчёта согласно методике, предложенной в главе 3 представлены в таблице 4.4 [1, 101 - 107, 113, 115 - 120]. Согласно технологическому регламенту эксплуатации газового промысла допустимый диапазон температур на выходе УАВО составляет от 20 до 25 °С

Таблица 4.4. Результаты расчёта оптимальных частот.

Температура на выходе секции T_2 , °С	f_1 , Гц	f_2 , Гц	Суммарная потребляемая мощность ΣP , кВт
25	26,56	14,92	13,08
24	26,61	16,16	13,66
23	26,62	17,45	14,31
22	26,60	18,79	15,06
21	26,54	20,19	15,94
20	26,46	21,63	16,96

Результаты расчётов в таблице 4.4 показывают, что суммарная потребляемая мощность охлаждающей секции увеличивается с уменьшением поддерживаемой температуры газа на выходе из секции АВО.

В таблице 4.5 приведено сравнение результатов вычисления суммарной потребляемой мощности при оптимальных частотах вращения в случае использования ЧРП со способом дискретных переключений при одинаковых заданных значениях температуры на выходе секции [109].

Таблица 4.5. Результаты расчёта потребляемой мощности.

Способ управления	Количество электродвигателей в работе	Температура на выходе секции T_2 , °С	Тепловой КПД секции η_c	Суммарная потребляемая мощность ΣP , кВт
Дискретные переключения	1	20,8	0,73	37,00
Частотный	4	20	0,73	16,96

Как видно из таблицы 4.5, при одинаковых значениях температуры на выходе секции эквивалентные тепловые КПД также получаются одинаковыми. Однако потребляемая мощность охлаждающей секции при оптимальном управлении ЧРП более чем в 2 раза меньше, чем при способе

дискретных переключений с одним работающим на номинальном режиме вентилятором [109].

Для оценки энергосберегающего эффекта сравним потребление электроэнергии с помощью модели [11, 12, 40, 41, 42, 51, 87, 91, 101, 109, 118, 120] не регулируемого и регулируемого электропривода. Из имеющейся в наличии у авторов истории наблюдения за работой АВО газа приведём три примера режима работы УОГ, представленные в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Примеры режимов работы УАВО.

Основные технологические параметры	Режим 1 29.06.11	Режим 2 27.10.11	Режим 3 03.03.12
Производительность V, тыс. м ³ /час	708,3	710,2	718,9
Температура на входе, T ₁ , °С	77,5	88,8	103,6
Температура наружного воздуха, T ₀ , °С	10	-5	-20
Температура на выходе, T ₂ , °С	11,5	18,8	20,2
Количество секций участвующих в охлаждении	11	8	6
Количество работающих вентиляторов	43	8	6

Из данных, представленных в таблице 4.6 видно, что количество включенных вентиляторов зависит от температуры охлаждающего воздуха и значительно возрастает в тёплое время года. Также видно, что при режимах 1 и 2 температура газа в выходном коллекторе ниже минимальной допустимой по регламенту. Регламент определяет диапазон от 20 до 25 °С.

Приведём в таблице 4.7 расчётные параметры рассмотренных режимов с помощью алгоритма [11, 12, 40, 41, 42, 51, 87, 91, 101, 118].

Таблица 4.7. Расчётные параметры работы УАВО.

Основные технологические параметры	Режим 1 29.06.11	Режим 2 27.10.11	Режим 3 03.03.12
Температура на выходе, T ₂ , °С	20÷25	20÷25	20÷25
Количество секций участвующих в охлаждении	8÷10	6÷7	6
Количество работающих вентиляторов	32÷40	24÷28	24

Из данных, представленных в таблице 4.7 видно, что расчётную температуру газа возможно поддерживать во всём диапазоне, установленном регламентом. Количество секций, участвующих в охлаждении, а следовательно количество включенных вентиляторов зависит от выбранной температуры на выходе УАВО. Также, как и в случае регулирования температуры методом дискретных переключений наблюдается зависимость количества включенных вентиляторов от температуры наружного воздуха.

Для корректного сравнения из таблицы 4.7 будем принимать значения, соответствующие выходной температуре 20 °С, т.к. именно эта температура наиболее близка к режимам при нерегулируемом электроприводе. Приведём эти данные ещё раз в таблице 4.8 и дополним их оптимальными частотами вращения вентиляторов, полученными при помощи алгоритма [11, 12, 40, 41, 42, 51, 87, 91, 101, 119, 120].

Таблица 4.8. Расчётные параметры работы УАВО при расчётных оптимальных частотах вращения вентиляторов.

Основные технологические параметры		Режим 1 29 июня	Режим 2 27 октября	Режим 3 03 марта
Температура на выходе, T_2 , °С		20	20	20
Количество секций участвующих в охлаждении		10	7	6
Количество работающих вентиляторов		40	24÷28	24
Оптимальные частоты вращения, мин^{-1}	$\omega_{11} = \omega_{12}$	115,2	132,3	132,3
	$\omega_{13} = \omega_{14}$	199,0	108,2	72,5

Стоит отметить, что частоты вращения четырёх электродвигателей одной секции в режиме 1 (тёплый период года) $\omega_{11} = \omega_{12} > \omega_{13} = \omega_{14}$, а в режиме 2 и в режиме 3, наоборот $\omega_{11} = \omega_{12} < \omega_{13} = \omega_{14}$. При номинальной частоте вращения электродвигателя 246 мин^{-1} . Другими слова при равномерном распределении тепловой нагрузки между ступенями охлаждения при двухступенчатой схеме охлаждения электрическая нагрузка распределяется неравномерно между ступенями. В тёплое время года электрическая нагрузка второй ступени больше электрической нагрузки

первой ступени, а в холодное время года – наоборот, электрическая нагрузка первой ступени больше электрической нагрузки второй ступени.

Как уже отмечалось, для оценки энергосберегающего эффекта сравним потребление электроэнергии УАВО за один час работы в заданном режиме с помощью модели [87, 91] нерегулируемого и регулируемого электропривода при рассчитанных оптимальных частотах вращения. Результаты представим в таблице 4 соответственно. Номинальная мощность электродвигателя вентилятора 37 кВт. В таблице 4.9 указываются значения потребляемой электроэнергии за один час работы УАВО в заданном режиме с учётом КПД электродвигателей, а потребление электроэнергии всеми работающими электродвигателями УАВО находится с учётом количества секций, участвующих в охлаждении и количества работающих вентиляторов (таблица 4.7 и 4.8).

Таблица 4.9. Потребление электроэнергии

Метод регулирования температуры	Потребление электроэнергии за один час работы	Режим 1 29 июня	Режим 2 27 октября	Режим 3 03 марта
Дискретных переключений	Одним нерегулируемым электродвигателем одной секции, кВт·ч	39,28	39,28	39,28
	Всеми работающими электродвигателями УАВО, кВт·ч	1689,04	314,24	235,68
Выбор оптимальных частот вращения	Четырьмя регулируемые электродвигателями одной секции, кВт·ч	52,36	23,42	19,93
	Всеми работающими электродвигателями УАВО, кВт·ч	523,6	163,94	119,58
Энергетический эффект, кВт·ч		1165,44	150,3	116,1

Из результатов, приведённых в таблице 4.9 видно, что потребление электроэнергии УОГ на охлаждение газа зависит от температуры наружного охлаждающего воздуха. Результаты моделирования показывают, что

применение регулируемого электропривода и выбор оптимальных частот вращения вентиляторов АВО газа позволяет достичь уменьшения потребления электроэнергии на охлаждение газа от двух до трёх раз, по сравнению с потреблением электроэнергии при регулировании температуры методом дискретных переключений за каждый час работы УАВО в заданном режиме. В тёплое время года для приведённых в тексте примеров режимов работы УОГ потребление электроэнергии уменьшается со значения 1689,04 кВт·час до значения 523,6 кВт·ч за каждый час работы УОГ в заданном режиме. В холодное время года потребление электроэнергии уменьшается со значения 314,24 кВт·ч до значения 163,94 кВт·ч в режиме 2 и со значения 235,68 кВт·ч до значения 119,58 кВт·ч в режиме 1 за каждый час работы УАВО в заданном режиме, что является значительным повышением энергетической эффективности работы предприятия.

Выводы по главе 4

1. Установлено, что применение комбинированного частотного пуска с подхватом преобразователя частоты обеспечивает возможность пуска механизма в режиме авторотации при всех возможных на практике скоростях авторотации, а также снизить износ изоляции электродвигателя. При этом относительное снижение срока службы изоляции практически не зависит от скорости вращения рабочего колеса в режиме авторотации, что обеспечивает увеличение ресурса работы электродвигателя. Ресурсосберегающий эффект от применения частотно-регулируемого электропривода увеличивается с ростом скорости обратного вращения в режиме авторотации.

2. Разработана программа для ЭВМ, которая позволяет определять относительное уменьшение срока службы изоляции, при кратковременных токовых перегрузках включая пуск электродвигателя, в том числе при пуске в режиме авторотации. С помощью программы можно определить

относительное изменение износа изоляции при пуске электродвигателя, жёстко сопряжённого с приводным механизмом, рабочий орган которого имеет вращение в момент пуска, с износом изоляции при прямом пуске из состояния покоя.

3. Показано, что разработанный способ управления электроприводами двухступенчатой секции АВО газа с оптимальным распределением тепловой нагрузки между ступенями охлаждения, позволяет достичь экономии электроэнергии до 50 % по отношению к регулированию дискретными переключениями.

4. Показано, что предлагаемый способ оптимального управления позволяет распределить тепловую нагрузку вдоль всей секции АВО газа и тем самым устранить неблагоприятные зоны интенсивного отбора тепла и снизить риск льдо-гидратообразований в теплообменной части.

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 сопротивление 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабанов В.А., Пашкин В.В. Факторы потребления электроэнергии электроприводами установок охлаждения газа // Сборник научных трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Электротехнологии. Электропривод и электрооборудование предприятий», г. Уфа, 2011 г.
2. Абакумов А.М., Голубев С.В., Миронов С.Ф., Третьяк Д.В. Стохастическая модель и оценка удельного потребления электроэнергии установками агрегатов воздушного охлаждения газа компрессорных цехов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: «Технические науки». 2005. № 37. С. 74-76.
3. Салихов З.С. Опыт эксплуатации опасных производственных объектов ООО «Газпром добыча Ямбург» в условиях Крайнего Севера/ З.С. Салихов, С.В. Мазанов, А.М. Кумушбаев, В.М. Козлов // Газовая промышленность. – 2010. – №8. – С.40-41.
4. ОСТ 51.40-93. Газы горючие природные, поставляемые и транспортируемые по магистральным газопроводам. Технические условия – М.: ВНИИГАЗ, 1993. – С.1.
5. СТО 2-2.3-377-2009 Регламент эксплуатации серийных АВО северных месторождений при температурах окружающего воздуха до минус 50 °С – М.: ЦКБН, 2009. – С.10, 4.
6. Ананенков А.Г., Ставкин Г.П., Талыбов Э.Г. АСУ ТП промыслов газоконденсатного месторождения Крайнего Севера. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999, С.15-17, 20-21, 41.
7. Грунвальд А.В. Использование метанола в газовой промышленности в качестве ингибитора гидратообразования и прогноз его потребления в период до 2030 г. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2007. №2. URL: http://ogbus.ru/authors/Grunvald/Grunvald_1.pdf.

8. Алимов С.В., Прокопец А.О., Кубаров С.В., Маланичев В.А., Устинов Е.В. Модернизация вентиляторов АВО газа при реконструкции КС МГ. Газовая промышленность № 4 2009 г. С. 54-56.

9. Пат. Способ автоматического управления процессом охлаждения сырого природного газа № 2285283 РФ С2G05D 23/19 / Г.А. Ланчаков, В.А. Ставицкий, А.Н. Кульков, В.В. Никаноров, В.И. Ворончак, В.А. Мыльцев, С.В. Щербинин, Г.Ю. Коловертнов, А.Н. Краснов, С.Ф. Латыпов №2004117653/28; Заявлено 09.06.2004; Опубл. 10.10.2006 Бюл.№ 3.

10. Белянкин Р.В., Устинов Е.В., Хромов К.С. Частотное регулирование для предотвращения образования гидратов природного газа при его охлаждении // Газовая промышленность, 2011. – №1. – С. 79-83.

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

12. Ивашкин О.Н., Пашкин В.В., Шабанов В.А. Моделирование процесса пуска электропривода АВО в режиме противовключения. Сборник научных трудов I международной (IV всероссийской) научно – технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий». С. 127 – 133.

13. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.:Энергия, 1978. - С.500

14. Жинов А.А., Шевелев Д.В. Исследование влияния ветра на производительность вентиляторов воздушно-конденсационной установки геотермальной электрической станции // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение» №1 2015., С. 108 – 118.

15. Тримбач А.А. Совершенствование электротехнических комплексов установок охлаждения компримированного газа: Автореф. дис. ...канд. техн. наук:05.09.03. – Саратов, 2007. – 20 с.

16. Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А. Аналитическое и экспериментальное исследование стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки № 7 (28) 2010, С. 113 – 117.

17. Абакумов А.М., Плешаков Д.В. Повышение энергоэффективности аппаратов воздушного охлаждения нефтепродуктов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2009. № 2 (24). С. 181.

18. Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А., Мосин В.Н. Автоматическое управление температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2011. № 1 (29) с. 151 – 157.

19. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т. 2 / Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Крюкова.–М.: Энергоатомиздат, 1989. –688 с.: ил. С.469.

20. Аппараты воздушного охлаждения природного газа типа АВГ – 75С: инструкция по монтажу и эксплуатации 712.1 ИЭ. Екатеринбург, ОАО «УралХимМаш», 1994. - С.16.

21. Пат. Способ автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения газа №2458256 РФ С2F04D 27/00 / А.М. Абакумов, С.В. Алимов, Л.А. Мигачёва, В.Н. Мосин, Д.В. Плешаков №2010112551/06; Заявлено 31.03.2010; Оpubл. 10.08.2012 Бюл. № 22.

22. Пат. Система управления аппаратами воздушного охлаждения газа №91605 РФ С2F04D 27/00 / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, Л.А. Мигачёва, В.Н. Мосин, Д.В. Плешаков № 2009136833/22; Заявлено 05.10.2009; Оpubл. 20.02.2010 Бюл. № 5.

23. Пат. Система управления аппаратами воздушного охлаждения газа №106310 РФ С2F04D 27/02 / О.В. Крюков №2011111667/07; Заявлено 28.03.2011; Опубл. 10.07.2011 Бюл. № 19.

24. Пат. Система управления аппаратами воздушного охлаждения газа №91606 РФ С2F04D 27/02 / Киянов Н.В., Крюков О.В., Захаров П.А., Аникин Д.А., Дадонов Д.С., заявл. 20.02.2010, опубл. 10.07.2011 Бюл. № 19.

25. Пат. Бесконтактный датчик скорости вращения и положения ротора: № 2488122 РФ / Загривный Э.А., Фоменко А.Н., Гаврилов Ю.А., Иваник В.В., Губарь Н.С., заявл. 13.02.12, опубл. 20.07.13, Бюл. № 20.

26. Пат. Способ определения скорости вращения погружных асинхронных электродвигателей: № 2463612 РФ / Ковалев А.Ю., Ковалева Н.А., Кузнецов Е.М., заявл. 10.02.11, опубл. 10.10.12, Бюл. № 28.

27. Пат. Бездатчиковая система безопасности для определения вращения барабана для белья бытового электроприбора с приводом от трехфазного асинхронного электродвигателя № 2012 104 995 / Боскариол Энрико (ИТ), Марсон Энрико (ИТ), Поза Паоло (ИТ). – Заявл. 20.08.2013, 20.06.2014 Бюл. № 17

28. Пат. Способ подхвата преобразователя частоты: № 2462808 РФ: / Кузькин В.И., Мелешкин В.Н., Московец В.Н., Мясищев С.В., заявл. 15.06.11, опубл. 27.09.12, Бюл. № 27.

29. Костенко М.П. Электрические машины. Специальная часть – Л.: Государственное энергетическое издательство, 1949. – С.712

30. Копылов И.П. Электрические машины: учебник – М.: Издательство Райт. 2012. – С.673.

31. Блюк В.В., Егоров А.В., Комков А.Н. Динамические режимы асинхронных электроприводов: классификация и терминология // Территория Нефтегаз. – 2017. – № 5. – С.86

32. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для вузов. – Спб.: Питер. – 2008.– С. 109-110.

33. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины, Ч. 2. Машины переменного тока. - Л.: Энергия, 1973. - 648 с.
34. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высшая школа, 1988. – 230 с.
35. Котлярчук В.А., Гончаров А.Ф. Электроснабжение экскаваторов. – М.: Надра, 1980. – 240 с.
36. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
37. Прохоров А. В. Надёжность систем электроизоляции тяговых электродвигателей // Энергобезопасность и энергосбережение. 2010. №2, С. 25–28.
38. Кузнецов Н. А. Надежность электрических машин. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с.
39. Хвостов В. С. Электрические машины: Машины постоянного тока: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1988. 336 с.
40. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. Экспериментальное исследование влияния рециркулирующего потока воздуха на пусковой ток и время пуска осевого вентилятора // Межвузовский сборник научных трудов: Повышение надёжности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов. – Уфа: УГНТУ, 2014.– С. 59-61.
41. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. Электромеханические процессы в электроприводе АВО газа при наличии рециркулирующего потока воздуха: моделирование и расчёт. – В межвузовском сборнике научных трудов: Повышение надёжности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов. – Уфа: УГНТУ, 2014.– С. 56-59.
42. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Способ пуска частотно-регулируемого электропривода вентиляторных установок в режиме авторотации // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов III Международной (VI Всероссийской) научно-

технической конференции // под ред. В.А. Шабанова – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – С. 18-25.

43. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Издательский центр Академия, 2007. – 368 с.

44. Ивановский И.Г. Шахтные вентиляторы: Учеб. пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. – С. 101.

45. Малиновский А.К. Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников: Учебник для вузов. – М: Недра, 1987. – С. 275.

46. Шабанов В.А. Основы регулируемого электропривода основных механизмов бурения, добычи и транспорта нефти. Учебное пособие для вузов. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2009. - 156 с.

47. Масандилов Л.Б., Москаленко В.В. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.

48. Вайнер И.Г. Математическая модель насоса с регулируемым электроприводом // Промышленная энергетика, 2009, №5, с. 23-28.

49. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. – М.: Энергия, 1972. – 240 с.

50. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

51. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. Применение функции «подхвата» преобразователя частоты для пуска электроприводов вентиляторных установок в режиме авторотации // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий. - V-й межвузовский сборник научных трудов «Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов», г. Уфа 2018 г.

52. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода. – Минск: Техноперспектива, 2006. С.51, 155-158.

53. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. - М.: МЭИ, 2007. -222 с., ил.

54. Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение (1-е изд.) учеб. пособие.: Академия, 2008. – 208 с.
55. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
56. Чиликин М.Г., Соколов Н.М., Терехов В.М., Шинянский А.В. Основы автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1974. – 568 с.
57. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/ Под ред. Л. Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп.– М.: Энергоатомиздат. – 1984.– С. 228-229.
58. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 5.
59. Арабский А.К. Система автоматического управления температурой на выходе АВО последней ступени компримирования ДКС в условиях Ямбургского НГКМ/ А.К. Арабский, Э.Г. Талыбов, И.А. Дяченко // Наука и техника в газовой промышленности. – 2009. – №2. – С.17-23.
60. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
61. Браславский И.Я. О возможностях энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов // Электротехника. – 1998. – № 8. – С. 2-6.
62. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – 4 – е изд., сокр. и перераб. – Л.: Энергоатомиздат. – 1984. – С. 370.
63. Казаков Ю.Б., Шумин А.А., Андреев В.А. Зависимость потерь в асинхронных двигателях от параметров широтно-импульсного регулирования напряжения. «Вестник ИГЭУ». Выпуск 3. Иваново, 2007.- С. 1–4.
64. Браславский И.Я., Зюзев А.М., Костылев А.В. Исследование свойств систем «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный

двигатель» с различными типами синхронизации // Электротехника. – 2000. – № 9. – С. 1-5.

65. Браславский И.Я., Зюзев А.М., Костылев А.В. Разработка, исследование, внедрение систем «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» // Электротехника. – 2004. – № 9. – С. 13-16.

66. Теплообмен в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов / И.Ф. Филиппов; Л.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.

67. Шрейнер Р.Т. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления [Текст]: учеб. пособие / Р.Т. Шрейнер, А.В. Костылев, В.К. Кривовяз, С.И. Шилин; под ред. проф. д-ра техн. наук Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. С. 9 -10.

68. Бугаев Г.А., Леонтьев А.Н., Ерохин Е.Ю., Павлова Д.В. Математические модели нагрева и охлаждения асинхронных двигателей для микропроцессорного реле тепловой защиты // Электротехника. – 2001. – № 2. – С. 51-54.

69. Кесслер А. Расчет нагрева асинхронных двигателей при тяжелом пуске и торможении противовключением // Электричество. – 1963. – № 6. – С. 12-17.

70. Цифровая релейная защита / Э.М. Шнейерсон; М.: Энергоатомиздат, 2007

71. Сташко В.И., Фефелов А.А., Поломошнов И.Ю., Ситникова В.О. Метод определения остаточного ресурса электродвигателя // Ползуновский вестник №4 2009 с. 104 – 108

72. Shabanov V. A., Khakimyanov M. I., Khakimov E. F. The Influence of Main Pump with High-Voltage Variable Frequency Drives on Electric Motors Periodic Repair // Applied Mechanics and Materials Vol. 698 (2015) pp 3-6.

73. Сташко В. И., Фефелов А. А., Поломошнов И. Ю., Ситникова В. О. Метод определения остаточного ресурса электродвигателей // Ползуновский вестник. 2009. №4. С. 104-108.

74. Михалёв С. В., Пирогов М. Г., Улучшение качества практического применения тепловых моделей электродвигателей // Энергоэксперт. 2011. №2. С. 52–54.

75. Метельников В. П. Оценка ресурса изоляции обмотки статора асинхронного двигателя при работе в циклических режимах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика» 2013. №2, т. 13. С. 96–99.

76. Хомутов О. И., Хомутов С. О., Сташко В. И., Грибанов А. А. Параметры теплового режима асинхронного электродвигателя для прогнозирования остаточного ресурса работы // Ползуновский вестник. 2004. №1. С. 279-284.

77. Крюков О. В., Степанов С. Е., Титов В. Г. Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. №2. С. 5–10.

78. Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615234 «Расчёт износа изоляции электродвигателей» / Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. от 13.05.2015

79. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Оценка ресурсосберегающего эффекта регулируемого электропривода // Сборник научных трудов XI Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», г. Чебоксары 2018 г.

80. Петушков М.Ю. Повышение ресурсоэффективности эксплуатации высоковольтных асинхронных электроприводов: Дис ... д-ра. техн. наук: 05.09.03. – Магнитогорск, 2015 г. – С.255.

81. Петров Л.П. Автоматическое управление торможением станочных электроприводов / Л.П. Петров, Р.Г. Подзолов, Л.В. Буштоян. – М.: Машиностроение, 1978 – С.5-7.

82. Мейстель А.М. Динамическое торможение приводов с асинхронными двигателями. Под редакцией М.Г. Чиликина. – М.: Издательство «Энергия». – 1967. – С. 31, 43-45.

83. Алексеев В.В., Вершинин В.И. Исследование возможности использования динамического торможения в частотно-регулируемых электроприводах турбомеханизмов // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. – URL: <http://www.online-electric.ru/articles.php?id=8>

84. Петрушин В.С., Якимец А.М., Еноктаев Р.Н., Бибик А.В. Исследование частотного пуска асинхронного двигателя при законе регулирования « $E/F=\text{const}$ » // Электротехнические и компьютерные системы. 2017. № 24 (100). С. 50-56.

85. Петрушин В.С., Якимец А.М., Бангула В.Б. Анализ пуска асинхронного двигателя с помощью тиристорного преобразователя напряжения // Електротехніка і електромеханіка. 2012. № 6. С. 31-33.

86. Анисимов В.А., Горнов А.О., Москаленко В.В., Рожанковский Ю.В. Специальные режимы пусковых устройств для асинхронных двигателей // Электротехника. – 1994. – № 7. – С. 23-26.

87. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. Определение скорости вращения асинхронного электродвигателя, вращающегося под действием рециркулирующего потока воздуха // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов. – Межвузовский сборник научных трудов (с международным участием), Уфа 2016 г.

88. Пашкин, В. В. Способ подхвата преобразователя частоты / В. В. Пашкин [и др.]: Пат. РФ № 2 656 846 С1, Заявлено 10.04.2017 Оpubл. 07.06.2018, Бюл. № 16.

89. Браславский И.Я., Плотников Ю.В. Математические модели для определения энергопотребления различными типами асинхронных электроприводов и примеры их использования // Электротехника. – 2005. – №9. – С. 14-18.

90. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В. Использование приложения Simulink для оценки потребления электроэнергии асинхронным электроприводом. Труды Второй Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». – М.: ИПУ РАН, 2004. - С. 1387 – 1394.

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

92. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты Екатеринбург: УРО РАН, 2000 г., 654 стр.

93. Косчинский С.Л., Колоколов Ю.В. Управление асинхронным электродвигателем в квазистационарных режимах «повторный пуск - подхват и удержание» // Электротехника. – 2007. – № 11. – С. 25-30

94. ГОСТ Р 54149–2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ. – 2012.– С. 6.

95. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии.

96. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. М.: Элекс-КМ, 2005. С. 85.

97. Егоров А.В., Комков А.Н., Малиновская Г.Н. К вопросу о взаимном влиянии электроприводов в составе электротехнической системы//Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 2. С. 106-112.

98. Королёв Т.В. Использование современных средств измерения для контроля энергетических параметров асинхронного электропривода.

Электротехнические системы и комплексы. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 16. Магнитогорск, 2009. С. 49 – 52.

99. Косчинский С.Л. Спецификация и формализация процессов управления асинхронного электропривода в составе АСУ ТП//Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. №6. С.35-40.

100. Колоколов Ю.В., Косчинский С.Л. Нелинейная динамика и синтез регуляторов тока асинхронного электропривода с векторным управлением//Электротехника. 2006. №7. С.7-12.

101. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Схема управления секцией АВО газа с частотным электроприводом // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов. - Межвузовский сборник научных трудов, посвященный юбилею кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» УГНТУ, г. Уфа 2014

102. Пашкин В.В. Эпюры распределения температуры вдоль секции АВО газа при дискретном и частотном регулировании электроприводов // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научных сборник, г.Уфа: УГАТУ, 2012

103. Пашкин В.В. Тепловые и аэродинамические характеристики АВО газа при дискретном переключении и частотном регулировании // Сборник научных трудов регионального научно-технического семинара «Современные проблемы разработки и внедрения АСУ ТП в нефтегазовом комплексе», г.Уфа, 2011

104. Артюхов И.И. Энергосберегающая технология охлаждения компримированного газа /И.И.Артюхов, И.И. Аршакян, А.В. Коротков, Н.В. Погодин// Энергосбережение в Саратовской области. - 2008. - № 1 (31). - С. 31 - 33.

105. Шайхутдинов А.З. Современные АВО газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли/ А.Х. Шайхутдинов, В.А. Лифанов, В.А. Маланичев // Газовая промышленность. – 2010. – №9. – С.40-41.

106. Алимов С.В. Повышение энергоэффективности стационарных режимов работы установок охлаждения газа с частотно – регулируемым электроприводом: Автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Самара., 2011. – С.24

107. Аршакян И.И. Повышение эффективности электротехнических комплексов установок охлаждения газа: Дис ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Саратов, 2004. – С.168.

108. Прибытков И. А., Левицкий И. А. Теоретические основы теплотехники. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 464 с.

109. 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>

110. Копырин В.С., Бакута В.П. Асинхронный частотно-регулируемый взаимосвязанный электропривод аппарата воздушного охлаждения нефтепродуктов // Силовая электроника №3 2005 г. – с. 38 – 41.

111. Копырин В.С., Бакута В.П. Асинхронный двухдвигательный частотный электропривод вентиляторов охладителей нефтепродуктов // Энергоанализ и энергоэффективность №4 2004 г.

112. Бакута В.П., Копырин В.С. Асинхронный четырёх двигательный частотный электропривод аппарата воздушного охлаждения нефтепродуктов // Промышленная энергетика №5 2005 г. – с. 38 – 41.

113. Захаров П.А., Крюков О.В. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях // «Вестник ИГЭУ» Вып. 2 2008 г. с. 1 – 7

114. Устинов Е.В. Уменьшение энергопотребления аппаратов воздушного охлаждения газа // Газовая промышленность, 2011. – №8 с. 54 –

115. Щербинин С.В., Коловертнов Г.Ю., Краснов А.Н., Новоженин А.Ю. Система автоматизированного управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа. Нефтегазовое дело, 2004.– № 1.– С. 2-4.

116. Бахтегареева А.Н., Гаррис Н.А., Гильванов В.Г. Оперативный способ регулирования температуры газа на выходе из компрессорной станции // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело».

117. Артюхов И.И., Аршакян И.И., Жабский М.В., Коротков А.В., Погодин Н.В., Тримбач А.А. Некоторые аспекты применения частотно-регулируемого электропривода в системах воздушного охлаждения компримированного газа // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. № 1 (10) вып.1 с. 29 – 39.

118. Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Шарипова С.Ф. Алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию снижения расхода электроэнергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2013. №2(9). С. 34-42.

119. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Алгоритм выбора оптимальных частот вращения вентиляторов АВО газа в двухступенчатой схеме охлаждения газа с частотным приводом // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов / под ред. В.А. Шабанова – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. – 299 с.

120. 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>.

121. Бондаренко О.В., Шабанов В.А. Оптимизация режима работы синхронного двигателя магистрального насоса НПС при частотном регулировании. Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий. I международная (IV всероссийская) научно – техническая конференция. – Уфа, 2013. - С. 64 – 74.

122. ГОСТ Р 50369-92. Электроприводы. Термины и определения. – М.: ГОССТАНДАРТ РОССИИ. – 1992.– С. 43.

123. Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615234 «Программа расчёта оптимальных частот вращения электроприводов АВО газа в двухступенчатой схеме охлаждения газа» / Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. от 13.05.2015.

124. 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.

Патент на изобретение «Способ подхвата преобразователя частоты»



Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015615234

Программа расчёта оптимальных частот вращения
электроприводов АВО газа в двухступенчатой схеме
охлаждения газа

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Уфимский государственный нефтяной
технический университет» (ФГБОУ ВПО УГНТУ) (RU)*

Авторы: *Шабанов Виталий Алексеевич (RU), Пашкин Василий
Валерьевич (RU), Ивашкин Олег Николаевич (RU)*

Заявка № 2015612035

Дата поступления 23 марта 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 13 мая 2015 г.



Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Курий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015615235

**Расчёт относительного уменьшения срока службы изоляции
электродвигателей**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВПО УГНТУ) (RU)*

Авторы: *Шабанов Виталий Алексеевич (RU), Пашкин Василий Валерьевич (RU), Ивашкин Олег Николаевич (RU)*

Заявка № 2015612036

Дата поступления 23 марта 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 13 мая 2015 г.



Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

Исходный текст программы

«Программа расчёта оптимальных частот вращения электроприводов АВО
газа в двухступенчатой схеме охлаждения газа»

Внутренняя директива вычислительному процессору Mathcad
Устанавливается нумерацию всех ячеек матриц начинать с единицы
ORIGIN := 1

Ввод исходных данных

$T_1 := 88.8$	температура газа на входе в АВО, градус Цельсия
$T_{2\text{мин}} := 20$	минимальная температура газа на выходе из АВО, градус Цельсия
$T_{2\text{макс}} := 25$	максимальная температура газа на выходе из АВО, градус Цельсия
$T_0 := -5.0$	температура охлаждающего воздуха на входе в АВО, градус Цельсия
$V := 710.2$	производительность, тыс. м ³ /час
$\rho_{\text{ср}} := 0.6$	средняя плотность перекачиваемого газа (средняя при 100 и 20 градусах Цельсия)
$C_p := 2444.5$	теплоёмкость газа, Дж/кгградус Цельсия
$n_{\text{АВО}} := 8$	количество установленных секций АВО
$G_{\text{в}} := 250$	расход воздуха через один АВО, кг/сек
$C_{\text{рв}} := 1000$	теплоёмкость воздуха, Дж/кгградус Цельсия
$K_1 := 0.8$	коэффициент нормативного ухудшения технического состояния АВО за период эксплуатации
$K := 23.5$	коэффициент теплопередачи АВО
$F := 3310$	площадь оребренной поверхности

Расчёт промежуточных данных

$$G := V \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot 1000 = 426120 \quad \text{массовый расход газа, кг}$$

$$\text{Тепловая_характеристика} := \begin{pmatrix} \text{"Массовый расход газа"} & \text{"}\mu\text{"} \\ 100000 & 0.867 \\ 150000 & 0.76 \\ 200000 & 0.68 \\ 250000 & 0.625 \end{pmatrix}$$

```

Опт := Таб ← ("№ Итер." "T1" "T0" "T2" "V тыс. м^3/час" "G кг/час" "Gг кг/час" "n" "Nсекц" "μном" "μс")
j ← 0
j ← j + 1
T2 ← T2макс
Q ←  $\frac{G \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)}{3600}$ 
t2 ←  $T_0 + \frac{Q}{n_{\text{АВО}} \cdot G_{\text{в}} \cdot C_{\text{рв}}}$ 
θ1 ← T1 - t2
θ2 ← T2 - T0

```

$$E_t \leftarrow 1 - 0.022 \cdot e^{\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0}}$$

$$\Theta_m \leftarrow (\Theta_1 - \Theta_2) \cdot \frac{E_t}{\ln\left(\frac{\Theta_1}{\Theta_2}\right)}$$

$$Q_{ABO} \leftarrow K_1 \cdot K \cdot F \cdot \Theta_m$$

$$n \leftarrow \frac{Q}{Q_{ABO}}$$

$$N_{\text{секц}} \leftarrow \text{ceil}(n) \text{ if } n < n_{ABO}$$

$$N_{\text{секц}} \leftarrow n_{ABO} \text{ otherwise}$$

$$G_T \leftarrow \frac{G}{N_{\text{секц}}}$$

$$\text{Номер_строки} \leftarrow \begin{cases} 2 & \text{if } (G_T \geq 0) \wedge (G_T < 125000) \\ 3 & \text{if } (G_T \geq 125000) \wedge (G_T < 175000) \\ 4 & \text{if } (G_T \geq 175000) \wedge (G_T < 225000) \\ 5 & \text{if } (G_T \geq 225000) \wedge (G_T < 275000) \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ном}} \leftarrow \text{Тепловая_характеристика}_{\text{Номер_строки}, 2}$$

$$\mu_c \leftarrow \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_0)}$$

$$k \leftarrow j$$

$$\text{Таб1} \leftarrow (k \ T_1 \ T_0 \ T_2 \ V \ G \ G_T \ n \ N_{\text{секц}} \ \mu_{\text{ном}} \ \mu_c)$$

$$\text{Таб} \leftarrow \text{stack}(\text{Таб}, \text{Таб1})$$

if $T_2 > T_{2\text{мин}}$

$$\text{while } j \geq 0 \wedge j < 15$$

$$\quad j \leftarrow j + 1$$

$$\quad T_2 \leftarrow T_2 - 1$$

$$\quad Q \leftarrow \frac{G \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)}{3600}$$

$$\quad t_2 \leftarrow T_0 + \frac{Q}{n_{ABO} \cdot G_B \cdot C_{pB}}$$

$$\quad \Theta_1 \leftarrow T_1 - t_2$$

$$\quad \Theta_2 \leftarrow T_2 - T_0$$

$$\quad E_t \leftarrow 1 - 0.022 \cdot e^{\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0}}$$

$$\quad \Theta_m \leftarrow (\Theta_1 - \Theta_2) \cdot \frac{E_t}{\ln\left(\frac{\Theta_1}{\Theta_2}\right)}$$

$$\quad Q_{ABO} \leftarrow K_1 \cdot K \cdot F \cdot \Theta_m$$

$$\quad n \leftarrow \frac{Q}{Q_{ABO}}$$

$N_{\text{секц}} \leftarrow \text{ceil}(n) \text{ if } n < n_{\text{ABO}}$ $N_{\text{секц}} \leftarrow n_{\text{ABO}} \text{ otherwise}$ $G_{\text{r}} \leftarrow \frac{G}{N_{\text{секц}}}$ $\text{Номер_строки} \leftarrow \begin{cases} 2 & \text{if } (G_{\text{r}} \geq 0) \wedge (G_{\text{r}} < 125000) \\ 3 & \text{if } (G_{\text{r}} \geq 125000) \wedge (G_{\text{r}} < 175000) \\ 4 & \text{if } (G_{\text{r}} \geq 175000) \wedge (G_{\text{r}} < 225000) \\ 5 & \text{if } (G_{\text{r}} \geq 225000) \wedge (G_{\text{r}} < 275000) \end{cases}$ $\mu_{\text{ном}} \leftarrow \text{Тепловая_характеристика}_{\text{Номер_строки}, 2}$ $\mu_{\text{с}} \leftarrow \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_0)}$ $k \leftarrow j$ $\text{if } T_2 \geq T_{2\text{мин}}$ $\quad \begin{cases} \text{Таб1} \leftarrow (k \ T_1 \ T_0 \ T_2 \ V \ G \ G_{\text{r}} \ n \ N_{\text{секц}} \ \mu_{\text{ном}} \ \mu_{\text{с}}) \\ \text{Таб} \leftarrow \text{stack}(\text{Таб}, \text{Таб1}) \end{cases}$ $j \leftarrow -1 \text{ otherwise}$ $k \leftarrow j$	Таб
---	--------------

$\text{Опт} =$	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>"№ Итер."</th> <th>"T1"</th> <th>"T0"</th> <th>"T2"</th> <th>"V тыс. м³/час"</th> <th>"G кг/час"</th> <th>"Gr кг/час"</th> <th>"n"</th> <th>"Nсекц"</th> <th>"μном"</th> <th>"μс"</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>88.8</td><td>-5</td><td>25</td><td>710.2</td><td>426120</td><td>71020</td><td>5.89</td><td>6</td><td>0.87</td><td>0.68</td></tr> <tr><td>2</td><td>88.8</td><td>-5</td><td>24</td><td>710.2</td><td>426120</td><td>60874.29</td><td>6.08</td><td>7</td><td>0.87</td><td>0.69</td></tr> <tr><td>3</td><td>88.8</td><td>-5</td><td>23</td><td>710.2</td><td>426120</td><td>60874.29</td><td>6.27</td><td>7</td><td>0.87</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>4</td><td>88.8</td><td>-5</td><td>22</td><td>710.2</td><td>426120</td><td>60874.29</td><td>6.47</td><td>7</td><td>0.87</td><td>0.71</td></tr> <tr><td>5</td><td>88.8</td><td>-5</td><td>21</td><td>710.2</td><td>426120</td><td>60874.29</td><td>6.68</td><td>7</td><td>0.87</td><td>0.72</td></tr> <tr><td>6</td><td>88.8</td><td>-5</td><td>20</td><td>710.2</td><td>426120</td><td>60874.29</td><td>6.89</td><td>7</td><td>0.87</td><td>0.73</td></tr> </tbody> </table>	"№ Итер."	"T1"	"T0"	"T2"	"V тыс. м ³ /час"	"G кг/час"	"Gr кг/час"	"n"	"Nсекц"	"μном"	"μс"	1	88.8	-5	25	710.2	426120	71020	5.89	6	0.87	0.68	2	88.8	-5	24	710.2	426120	60874.29	6.08	7	0.87	0.69	3	88.8	-5	23	710.2	426120	60874.29	6.27	7	0.87	0.7	4	88.8	-5	22	710.2	426120	60874.29	6.47	7	0.87	0.71	5	88.8	-5	21	710.2	426120	60874.29	6.68	7	0.87	0.72	6	88.8	-5	20	710.2	426120	60874.29	6.89	7	0.87	0.73
"№ Итер."	"T1"	"T0"	"T2"	"V тыс. м ³ /час"	"G кг/час"	"Gr кг/час"	"n"	"Nсекц"	"μном"	"μс"																																																																				
1	88.8	-5	25	710.2	426120	71020	5.89	6	0.87	0.68																																																																				
2	88.8	-5	24	710.2	426120	60874.29	6.08	7	0.87	0.69																																																																				
3	88.8	-5	23	710.2	426120	60874.29	6.27	7	0.87	0.7																																																																				
4	88.8	-5	22	710.2	426120	60874.29	6.47	7	0.87	0.71																																																																				
5	88.8	-5	21	710.2	426120	60874.29	6.68	7	0.87	0.72																																																																				
6	88.8	-5	20	710.2	426120	60874.29	6.89	7	0.87	0.73																																																																				

Оценка энергетической эффективности

$i := 1..6$

$\mu_{\text{с}}(i) := \text{Опт}_{i+1,11}$

Функция для определения степени охлаждения $\mu_{\text{с}}$ из исходной таблицы Опт

$\mu_{\text{ном}}(i) := \text{Опт}_{i+1,10}$

Функция для определения степени охлаждения $\mu_{\text{ном}}$ из исходной таблицы Опт

$v := \frac{3}{0.8} = 3.75$

$$\text{Решение} := \left[\begin{array}{l} \mu_1^{v-1} - \left(\frac{\mu_c(1) - \mu_1}{1 - \mu_1} \right)^{\frac{(v-1)}{(v+1)}} \cdot (1 - \mu_c(1)) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } \mu_1 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 0.522970488899314682627 \\ \mu_1^{v-1} - \left(\frac{\mu_c(2) - \mu_1}{1 - \mu_1} \right)^{\frac{(v-1)}{(v+1)}} \cdot (1 - \mu_c(2)) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } \mu_1 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 0.52351576818182089053 \\ \mu_1^{v-1} - \left(\frac{\mu_c(3) - \mu_1}{1 - \mu_1} \right)^{\frac{(v-1)}{(v+1)}} \cdot (1 - \mu_c(3)) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } \mu_1 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 0.52360770098547916418 \\ \mu_1^{v-1} - \left(\frac{\mu_c(4) - \mu_1}{1 - \mu_1} \right)^{\frac{(v-1)}{(v+1)}} \cdot (1 - \mu_c(4)) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } \mu_1 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 0.52323196914069837066 \\ \mu_1^{v-1} - \left(\frac{\mu_c(5) - \mu_1}{1 - \mu_1} \right)^{\frac{(v-1)}{(v+1)}} \cdot (1 - \mu_c(5)) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } \mu_1 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 0.52237358472783908472 \\ \mu_1^{v-1} - \left(\frac{\mu_c(6) - \mu_1}{1 - \mu_1} \right)^{\frac{(v-1)}{(v+1)}} \cdot (1 - \mu_c(6)) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } \mu_1 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 0.52101679392627365345 \end{array} \right] = \begin{pmatrix} 0.523 \\ 0.524 \\ 0.524 \\ 0.523 \\ 0.522 \\ 0.521 \end{pmatrix}$$

$\mu_1(i) := \text{Решение}_{i,1}$ Функция для определения степени охлаждения μ_1 из исходной таблицы Решение

$$\mu_1(2) = 0.524$$

$$\mu_2(i) := \frac{\mu_c(i) - \mu_1(i)}{1 - \mu_1(i)}$$

$$\mu_2(i) = \begin{pmatrix} 0.33 \\ 0.351 \\ 0.373 \\ 0.396 \\ 0.42 \\ 0.444 \end{pmatrix}$$

Расчёт частоты вращения рабочих колёс вентиляторов

$$n_{\text{НОМ}} := 250$$

$$n_1(i) := n_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{\mu_1(i)}{\mu_{\text{НОМ}}(i)} \right)^{1.25} \quad n_2(i) := n_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{\mu_2(i)}{\mu_{\text{НОМ}}(i)} \right)^{1.25}$$

$$n_1(i) = \begin{pmatrix} 132.896 \\ 133.069 \\ 133.099 \\ 132.979 \\ 132.707 \\ 132.276 \end{pmatrix} \quad n_2(i) = \begin{pmatrix} 74.611 \\ 80.775 \\ 87.224 \\ 93.947 \\ 100.934 \\ 108.171 \end{pmatrix}$$

$$f_{\text{НОМ}} := 50$$

$$f_1(i) := f_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{n_1(i)}{n_{\text{НОМ}}} \right) \quad f_2(i) := f_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{n_2(i)}{n_{\text{НОМ}}} \right)$$

$$f_1(i) = \begin{pmatrix} 26.579 \\ 26.614 \\ 26.62 \\ 26.596 \\ 26.541 \\ 26.455 \end{pmatrix} \quad f_2(i) = \begin{pmatrix} 14.922 \\ 16.155 \\ 17.445 \\ 18.789 \\ 20.187 \\ 21.634 \end{pmatrix}$$

Оценка потребляемой мощности

$$P_{\text{НОМ}} := 37$$

$$P := \begin{pmatrix} \text{"Расчёт потребляемой мощности"} \\ 2 \cdot \left[P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_1(1)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 + P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_2(1)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 \right] \\ 2 \cdot \left[P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_1(2)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 + P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_2(2)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 \right] \\ 2 \cdot \left[P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_1(3)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 + P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_2(3)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 \right] \\ 2 \cdot \left[P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_1(4)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 + P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_2(4)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 \right] \\ 2 \cdot \left[P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_1(5)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 + P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_2(5)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 \right] \\ 2 \cdot \left[P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_1(6)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 + P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{f_2(6)}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3 \right] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{"Расчёт потребляемой мощности"} \\ 13.083 \\ 13.656 \\ 14.31 \\ 15.064 \\ 15.939 \\ 16.955 \end{pmatrix}$$

Исходный текст программы

«Расчёт износа изоляции электродвигателей»

Внутренняя директива вычислительному процессору Mathcad
Устанавливается нумерацию всех ячеек матриц начинать с единицы
ORIGIN := 1

Исходные данные

$j := 2$ Плотность тока в обмотке
 $\Delta\tau_{\text{НОМ}} := 115$ Допустимое превышение температуры
 $\Delta\tau_{\text{МНОМ}} := 35$ Исходный нагрев
 $K := 4.5$ Кратность перегрузки (кратность пикового тока)
 $b := 0.069$ Коэффициент

Время :=	"Начальное скольжение"	"Время пуска"
	"s=1.0"	10
	"s=1.1"	11.5
	"s=1.2"	13
	"s=1.3"	14.5
	"s=1.4"	17
	"s=1.5"	20
	"s=1.6"	25
	"s=1.7"	34.5

$t_{\text{перер}}(i) := \text{Время}_{i+1,2}$ Функция для определения степени охлаждения μ_1 из исходной таблицы Решение

Расчет

$T_c := \frac{150 \cdot \Delta\tau_{\text{НОМ}}}{j^2} = 4312.5$ постоянная времени нагрева обмотки статора в секундах
 $i := 1..8$

Износ изоляции в относительных единицах

$$z(i) := \frac{T_c^2 \cdot e^{b \cdot \Delta\tau_{\text{НОМ}}}}{b \cdot \Delta\tau_{\text{МНОМ}} \cdot (K^2 - 1) \cdot t_{\text{перер}}(i)} \left[4 \cdot e^{\frac{b \cdot \Delta\tau_{\text{МНОМ}} \cdot (K^2 - 1) \cdot t_{\text{перер}}(i)}{2 \cdot T_c}} + e^{\frac{b \cdot \Delta\tau_{\text{МНОМ}} \cdot (K^2 - 1) \cdot t_{\text{перер}}(i)}{T_c}} \cdot \left(1 + \frac{t_{\text{перер}}(i)}{T_c} \right) - 5 - \frac{t_{\text{перер}}(i)}{T_c} \right]$$

$z(i) =$

$37.503 \cdot 10^6$
$37.714 \cdot 10^6$
$37.927 \cdot 10^6$
$38.142 \cdot 10^6$
$38.504 \cdot 10^6$
$38.945 \cdot 10^6$
$39.697 \cdot 10^6$
$41.187 \cdot 10^6$

	"Начальное скольжение"	"Безразмерная величина ξC "
Износ_изоляции :=	"s=1.0"	$z(1)$
	"s=1.1"	$z(2)$
	"s=1.2"	$z(3)$
	"s=1.3"	$z(4)$
	"s=1.4"	$z(5)$
	"s=1.5"	$z(6)$
	"s=1.6"	$z(7)$
	"s=1.7"	$z(8)$

	"Начальное скольжение"	"Безразмерная величина ξC "
Износ_изоляции =	"s=1.0"	37.503×10^6
	"s=1.1"	37.714×10^6
	"s=1.2"	37.927×10^6
	"s=1.3"	38.142×10^6
	"s=1.4"	38.504×10^6
	"s=1.5"	38.945×10^6
	"s=1.6"	39.697×10^6
	"s=1.7"	41.187×10^6

Увеличение износ изоляции в относительных единицах при пуске вентилятора имеющего обратное вращения по сравнению с прямым пуском из состояния покоя

	"Начальное скольжение"	"Увеличение в % по сравнению с пуском из состояния покоя"
Увеличение_износа :=	"s=1.0"	$\frac{z(1) - z(1)}{z(1)} \cdot 100$
	"s=1.1"	$\frac{z(2) - z(1)}{z(1)} \cdot 100$
	"s=1.2"	$\frac{z(3) - z(1)}{z(1)} \cdot 100$
	"s=1.3"	$\frac{z(4) - z(1)}{z(1)} \cdot 100$
	"s=1.4"	$\frac{z(5) - z(1)}{z(1)} \cdot 100$
	"s=1.5"	$\frac{z(6) - z(1)}{z(1)} \cdot 100$
	"s=1.6"	$\frac{z(7) - z(1)}{z(1)} \cdot 100$
	"s=1.7"	$\frac{z(8) - z(1)}{z(1)} \cdot 100$

	"Начальное скольжение"	"Увеличение в % по сравнению с пуском из состояния покоя"
Увеличение_износа =	"s=1.0"	0
	"s=1.1"	0.56
	"s=1.2"	1.13
	"s=1.3"	1.7
	"s=1.4"	2.67
	"s=1.5"	3.85
	"s=1.6"	5.85
	"s=1.7"	9.82

ПРИЛОЖЕНИЕ Д



Общество с ограниченной ответственностью «Газпром добыча Ямбург»
(ООО «Газпром добыча Ямбург»)

« 01 » 12 20 23 г.

№ б/н

г. Новый Уренгой

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер - первый
заместитель генерального директора
ООО «Газпром добыча Ямбург»

 В.В. Моисеев
« 01 » 12 2023

АКТ

**об использовании результатов диссертационного исследования
Пашкина Василия Валериевича**

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук инженера-энергетика I категории газового промысла № 5 Газопромыслового управления Пашкина В.В. по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы», выполненной Пашкиным В.В. в соответствии с предоставленным грантом генерального директора ООО «Газпром добыча Ямбург», использованы в производственном процессе и оформлены в качестве рационализаторских предложений: № 876/ГПУ «Способ торможения лопастей АВО газа, вращающихся под действием потока рециркуляции и устройство на его основе», № 888/ГПУ «Статическое устройство торможения электропривода АВО газа перед пуском», № 938/ГПУ «Тиристорный пускатель, адаптированный для электропривода АВО газа, имеющего обратное вращение».

При использовании указанных рационализаторских предложений достигнуто повышение безопасности обслуживания при проведении ремонтных работ, снижение рисков досрочной выработки ресурса электродвигателя. Результаты приведённых исследований имеют практическую значимость для повышения энергоэффективности электротехнических комплексов газопромысловых объектов.

Главный энергетик – начальник ОГЭ

 Э.Ю. Кондратьев

Главный инженер ГПУ

 Э.Ф. Гизулин

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебно-методической
работе ФГБОУ ВО «УГНТУ»

А.И. Могучев

« 15 » 05 2024 г.

АКТ

**внедрения результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Пашкина Василия Валериевича
«Энергоресурсосберегающие режимы работы электротехнического
комплекса воздушного охлаждения газа» в учебный процесс
кафедры «Электротехника и электрооборудования предприятий»**

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что теоретические и практические результаты кандидатской диссертации Пашкина В.В., а именно:

– анализ электромеханических процессов в электродвигателях при аэродинамическом противодавлении среды с авторотацией исполнительных механизмов вентиляторных установок для решения задач управления электроприводами;

– результаты моделирования динамических режимов и анализа энергетических характеристик различных способов пуска асинхронных электродвигателей вентиляторных установок;

– иммитационные модели электроприводов установки охлаждения газа, для оценки энергетической эффективности частотно-регулируемого электропривода,

используются в учебной и научной деятельности кафедры «Электротехника и электрооборудования предприятий» УГНТУ, при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Электрический привод» учебного плана направлений 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ, подготовке аспирантов и магистров.

Директор IT-института
д-р. техн. наук, профессор



З.Х. Павлова

И.о. заведующего кафедрой ЭЭП
Старший преподаватель



А.Н. Яшин