

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Мигачев Алексей Викторович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Специальность 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Абакумов А.М.

Самара 2017

Оглавление

	Ввеление	Стр.
1	Анализ состояния проблемы и постановка залачи	5
	исследования	11
1.1	Общие сведения об охлаждении природного газа на КС МГ	11
1.2	Аналитический обзор литературных источников по состоянию	
	проблемы	16
	Выводы по разделу	21
2	Исследование статических и динамических характеристик	
	объекта управления	23
2.1	Общие сведения об объекте управления	23
2.2	Экспериментальное исследование характеристик объекта	
	управления	28
	Выводы по разделу	44
3	Исследование САУ АВО газа традиционной структуры	46
3.1	Характерные особенности САУ АВО газа	46
3.2	Одноконтурная САУ АВО газа с ПИД-регулятором в прямой цепи	[
	и апериодическим фильтром на входе	49
3.2.1	Синтез регуляторов	49
3.2.2	Исследование показателей качества регулирования температуры	
	газа для задающего воздействия	52
3.3	Одноконтурная САУ АВО газа с ПИД-регулятором в прямой цепи	[
	и двойным апериодическим фильтром на входе	57
3.3.1	Синтез регулятора	58
3.3.2	Исследование показателей качества регулирования частоты	
	вращения вентиляторов для задающего воздействия	58
3.3.3	Исследование показателей качества переходных процессов по	
	возмущающему воздействию	63

3.4	Одноконтурная САУ АВО газа с ПИ-регулятором в прямой цепи						
	и апериодическим фильтром на входе	68					
3.4.1	Синтез регулятора	68					
3.4.2	Исследование показателей качества регулирования для задающего)					
	воздействия	72					
	Выводы по разделу	79					
4	Синтез нетрадиционных структур САУ АВО газа	81					
4.1	Одноконтурная САУ АВО газа с И-регулятором в прямой цепи и						
	форсирующим звеном в цепи обратной связи	81					
4.1.1	Синтез регулятора	81					
4.1.2	Исследование показателей качества переходных процессов по						
	возмущающему воздействию	85					
4.2	Двухконтурная САУ АВО газа с И-регулятором в прямой цепи и						
	форсирующим звеном в цепи обратной связи	89					
4.2.1	Синтез регуляторов	89					
4.2.2	Исследование показателей качества регулирования по задающему						
	воздействию	93					
4.2.3	Исследование показателей качества переходных процессов по						
	возмущающему воздействию	95					
4.3	Сравнительный анализ вариантов САУ АВО газа	98					
	Выводы по разделу	106					
5	Разработка и экспериментальное исследование САУ АВО						
	газа	108					
5.1	Реализация САУ АВО газа	108					
5.2	Экспериментальное исследование САУ АВО газа	116					
5.3	Оценка экономии электроэнергии при использовании САУ АВО						
	газа	121					
	Выводы по разделу	128					
	Заключение	129					
	Список литературы	131					

введение

Актуальность темы исследования. В настоящее время на предприятиях газовой промышленности в соответствии с «Концепцией энергосбережения и повышения энергоэффективности ОАО «Газпром» на период 2011 – 2020 гг.» большое внимание уделяется совершенствованию и повышению энергетической эффективности технологических процессов.

Охлаждение газа после компримирования является одной ИЗ технологических операций при транспорте природного газа по магистральным газопроводам[8, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 35, 43, 44, 45, 47, 51, 53, 54, 57, 58, 59, 63, 64, 69, 73, 75, 81, 84, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 113]. Типовые установки охлаждения газа (УОГ), устанавливаемые на компрессорных станциях (КС), содержат параллельно включенные аппараты воздушного охлаждения (ABO) с вентиляторами, приводимыми в движение асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором.

При управлении режимами работы установок охлаждения необходимо обеспечить: во-первых, достаточно жесткие требования по поддержанию требуемой температуры газа на выходе установки, во-вторых, энергосберегающие режимы работы УОГ, т.к. установленная мощность электроприводов УОГ составляет около 1 МВт, и на нужды охлаждения газа на компрессорных станциях с газотурбинным приводом приходится около 60% расхода электроэнергии, потребляемой на производственные нужды. Эффективным способом решения указанных задач является использование систем автоматического управления (САУ) на базе частотно-регулируемого привода (ЧРП) вентиляторов АВО, что определяет актуальность темы исследования.

Степень разработанности проблемы

Известен ряд научных работ, посвященных исследованию проблемы повышения энергоэффективности управления режимами работы ABO газа. Среди них следует отметить публикации С. В. Алимова, И. И. Артюхова,

С. В. Голубева, М. С. Ершова, И. И. Аршакяна, А. И. Данилушкина, В. Г. Крайнова, В. А. Маланичева, Д. С. Мочалина, Б. Г. Меньшова, В. Г. Титова, Р. Ш. Тарисова, Д. В. Третьяка, А. А. Тримбача, А. З. Шайхутдинова и др. В них показано, что использование частотного регулирования скорости вентиляторов АВО вместо используемого на большинстве КС дискретного регулирования (включения/выключения) двигателей вентиляторов оператором, обеспечивает существенную экономию электроэнергии на цели охлаждения. В известных работах исследованы вопросы математического описания АВО, оценено влияние алгоритмов управления на энергетические характеристики процесса охлаждения природного газа, рассмотрены оптимальные алгоритмы дискретного управления стационарными режимами УОГ С учетом энергетической эффективности каждого аппарата, рассмотрены способы совершенствования энергетических характеристик АВО и снижения затрат на нужды охлаждения газа за счет прогнозирования электропотребления, обсуждаются вопросы совершенствования алгоритмов управления АВО газа, предложены решения по обеспечению электромагнитной совместимости группы ЧРП с питающей сетью.

САУ АВО газа имеют ряд специфических особенностей, в частности, параметры объекта управления могут варьировать в значительных пределах вследствие изменения внешних условий и режима работы газопровода. Кроме того, для таких систем алгоритмы управления должны строиться таким образом, чтобы обеспечить требуемое качество переходных процессов не только для температуры газа, но и для частоты вращения вентиляторов.

Несмотря на значительное количество публикаций, ряд вопросов совершенствования САУ АВО газа с учетом отмеченных требований к качеству управления и специфических особенностей объекта до настоящего времени остаются открытыми. Указанные обстоятельства определяют актуальность проблемы совершенствования алгоритмов управления, реализуемых САУ АВО газа.

Цель работы: повышение точности поддержания требуемых технологических режимов работы УОГ КС магистральных газопроводов и обеспечение энергетической эффективности функционирования ABO газа.

Решаемые задачи:

 исследование статических и динамических характеристик ABO газа как объекта управления;

- выявление требований к характеристикам САУ АВО газа;

- разработка методики синтеза САУ АВО газа традиционной структуры и исследование показателей качества регулирования;

- разработка методики структурно-параметрического синтеза САУ
 ABO газа с использованием регуляторов в цепи обратной связи и исследование показателей качества регулирования;

- анализ областей эффективного применения систем различной структуры;

- экспериментальное исследование САУ АВО газа.

Объект исследования: САУ АВО газа с ЧРП вентиляторов КС магистральных газопроводов.

Предмет исследования: алгоритмы управления и структуры САУ АВО газа с ЧРП вентиляторов и энергетическая эффективность их использования.

Научная новизна:

- методика и результаты параметрической идентификации ABO газа как объекта управления, учитывающие инерционность датчика температуры;

- методика синтеза вариантов САУ АВО газа с регуляторами в прямой цепи системы, отличающаяся учетом требований к качеству переходных процессов изменения частоты вращения вентиляторов;

- методика структурно-параметрического синтеза одноконтурной и многоконтурной САУ АВО газа с регуляторами в прямой цепи и цепи обратной связи, отличающаяся учетом требований к динамическим

характеристикам системы в условиях широкого диапазона вариаций параметров объекта управления.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработаны методики синтеза регуляторов и выбора структуры САУ ABO газа, обеспечивающие требуемую точность поддержания температурного режима установок охлаждения в условиях вариаций параметров транспортируемого газа и внешней среды;

- использование разработанной САУ АВО газа промышленной установкой охлаждения газа КС магистрального газопровода позволило обеспечить заданные технологические требования по поддержанию температурного режима работы установки и создало предпосылки для существенного снижения расхода электроэнергии на цели охлаждения;

- предложенные методики расчета и проектирования использованы при разработке и внедрении САУ АВО газа промышленной УОГ и используются в учебном процессе при переподготовке специалистов ОАО «Газпром».

Методы исследования. В работе при решении поставленных задач использовались методы теории автоматического управления, методы идентификации объектов управления, математического моделирования на ПК в программах Matlab, Mathcad.

Положения, выносимые на защиту:

- методика и результаты параметрической идентификации ABO газа как объекта управления;

- методика и результаты синтеза вариантов САУ АВО газа с регуляторами в прямой цепи системы;

 - структурно-параметрический синтез одноконтурной и многоконтурной САУ АВО газа с регуляторами в прямой цепи и цепи обратной связи;

- конкретная структура САУ АВО газа, результаты экспериментального

исследования характеристик и эффективности использования разработанной системы.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов исследования определяется корректным использованием соответствующего математического аппарата, подробной оценкой и научным обоснованием принятых допущений, использованием сертифицированного оборудования при проведении экспериментальных исследований и подтверждается согласованностью результатов теоретического исследования с экспериментальными данными. Результаты диссертационной работы использованы при разработке и внедрении САУ АВО газа, находящейся в настоящее время в промышленной эксплуатации на КС ООО «Газпром трансгаз Югорск».

Материалы диссертации обсуждались докладывались И на международных и всероссийских научно-технических конференциях: XII и Международной научно-практической конференции «Ашировские XIII чтения. Проблемы энергетического обеспечения нефтегазового комплекса» (Самара, 2015, 2016 гг.); VIII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Актуальные исследования гуманитарных, естественных, общественных наук» (Новосибирск, 2016 г.); (заочной) XIII Международной научно-практической конференции «Современные научные исследования: методология, теория, практика» (Красноярск, 2016 г.); Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан, «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (Альметьевск, 2016 г.); а также на научных семинарах кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 5 статей в других российских и зарубежных изданиях, получено 2 патента РФ.

Научная квалификационная работа на соискание степени

кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует формуле специальности: «... принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного... назначения».

Объектом изучения: «...являются электротехнические комплексы и системы... электропривода... промышленных ...предприятий и организаций».

Область исследования соответствует пунктам: 1 «...математическое и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», 3 «...разработка алгоритмов эффективного управления», 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах...».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы (113 наименований), включает 144 страницы машинописного текста, 80 рисунков и 30 таблиц.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Общие сведения об охлаждении природного газа на КС МГ

Типовой технологической операцией на компрессорных станциях МГ является охлаждения газа после компримирования. Компримирование приводит к повышению температуры газа в зависимости от различных условий до 75 °C [35].

Необходимость охлаждения газа определяется рядом обстоятельств. Отметим основные из них.

1) В случае повышенной температуры газа на выходе КС возникает значительный температурный перепад по длине трубопровода, что снижает его продольную устойчивость. Особенно резко этот эффект проявляется для трубопроводов большого диаметра, т.к. с ростом диаметра уменьшается относительная величина теплообмена с окружающей средой.

2) Снижение температуры газа позволяет повысит пропускную способность трубопровода и обеспечить экономию топливного газа на работу газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Расчеты, приведенные в [57], показывают, что в среднем снижение температуры транспортируемого газа на 3°С позволяет повысит пропускную способность трубопровода на 1%.

3) Снижение температуры транспортируемого газа и ее стабилизация позволяет снизить интенсивность процессов коррозии. В [37] отмечается, что колебания температуры газа ведут к интенсификации процессов коррозии трубы и, соответственно, к сокращению срока службы трубопровода. Причем наиболее неблагоприятный режим работы трубопровода возникает при неэффективной стабилизации температуры газа. А в случае, когда охлаждение газа отсутствует, колебания температуры газа близки к колебаниям температуры наружного воздуха. Следовательно, необходимо не только охлаждать газ после компримирования, но и обеспечивать стабилизацию его температуры с требуемой точностью. 4) Особенно актуален вопрос охлаждения газа для северных месторождений страны, расположенных в зоне многолетнемерзлых грунтов. Без надлежащего охлаждения газа возможно растепление газопроводов и образование зон протаивания в летний период. Последующее их замерзание в зимний период приводит к возникновению недопустимых по механической прочности трубопровода продольных и поперечных сил.

Требования к температуре газа на выходе установок охлаждения газа для северных районов страны иллюстрируют графики (рисунок 1.1) рекомендуемых температур после ABO газа на компрессорных станциях предприятий OAO «Газпром трансгаз Югорск» [10, 12].

Рекомендуемые температуры задаются с учетом климатических условий. Для верхней кривой 4 рекомендуемой температуры на рисунке 1.1 дополнительно показаны графики температуры воздуха и грунта в районе компрессорной станции. Более низко расположенные кривые рекомендуемых температур (1, 2, 3) соответствуют компрессорным станциям, для которых температура рассматриваемой. воздуха И грунта ниже, чем ДЛЯ Рекомендуемые температуры газа после АВО определены из условия обеспечения на входе следующей компрессорной станции температуры газа близкой к температуре грунта.

Для охлаждения газа после компримирования на КС используются установки охлаждения газа (УОГ), содержащие несколько параллельно включенных ABO. Аппараты воздушного охлаждения имеют теплообменник, выполненный из нескольких рядов оребренных труб, и вентиляторы с электроприводом, обеспечивающие перемещение охлаждающей среды. Как правило, поверхность теплообменника располагается горизонтально и используются вентиляторы осевого типа с электроприводом от асинхронных короткозамкнутых электродвигателей.

Различные типы ABO конструктивно отличаются, прежде всего, взаимным пространственным расположением теплообменника и вентиляторов.



Рисунок 1.1 – График рекомендуемой температуры газа на выходе ABO, °С

- 1 Уренгой, Пангоды, Харысейская, Ныда.
- 2 Сорум, Сосновская, Белый Яр, Верх. Казымская.
- 3 Узюм-Юган, Комсомольская, Таежная.
- 4 Пелым, Ивдель, Нов. Ивдель.

Наиболее часто вентиляторы располагаются под теплообменником, т.е. используется нагнетательный принцип подачи охлаждающего воздуха. В частности, этот способ используется, в получивших широкое применение отечественных аппаратах типа 2АВГ-75. При этом на каждом аппарате используются два тихоходных электродвигателя серии ВАСО с установкой вентилятора без редуктора, непосредственно на вал двигателя.

Одним из способов повышения эффективности процесса охлаждения газа является совершенствование характеристик АВО [11, 12, 15, 98, 99].

ABO зарубежных Для производства фирм характерно ряда использование вытяжной тяги, когда вентиляторы располагаются над В теплообменником. аппаратах обычно таких используются электродвигатели с синхронной частотой вращения 1500 об/мин, имеющие более высокие энергетические характеристики по сравнению с тихоходными двигателями. В этом случае для обеспечения требуемой частоты вращения вентилятора его вал соединяется с валом электродвигателя через клиноременную передачу, что усложняет конструкцию аппарата.

Важнейшим показателем работы УОГ является температурный перепад создаваемый установкой – разность температур газа на входе и выходе установки. Эту величину называют также глубиной охлаждения. Глубина охлаждения зависит от параметров внешней среды, параметров транспортируемого газа, режима работы установки. В связи с этим возникает задача управления режимом работы УОГ с целью обеспечения охлаждения газа до заданной температуры.

Для управления режимами работы УОГ используются различные способы.

Наиболее применяемым в настоящее время является дискретный способ регулирования температуры, заключающийся В включении/отключении электродвигателей АВО. При таком регулировании [10, 16, 18, 21, 94] мощность, потребляемая на охлаждение, изменяется пропорционально числу включенных вентиляторов, и, при прочих равных изменяется температурный перепад УОГ. условиях, аналогично на способа Очевидными недостатками такого регулирования является обусловленная дискретностью низкая точность регулирования и большие длительные пусковые токи асинхронных короткозамкнутых двигателей вентиляторов, вызванные переходным процессом пуска механизма с большим моментом инерции.

Для производительности вентиляторов ABO регулирования используется также изменение угла установки лопастей вентиляторов [57, 113]. Эта операция производится, как правило, сезонно, достаточно трудоемка и может приводить к разбалансировке роторов вентиляторов, что вызывает дополнительные вибрации И сокращение срока службы вентиляторов.

Возможно также регулирование температурного перепада на ABO с помощью жалюзи. Однако оно связано с увеличением аэродинамического сопротивления аппарата и соответственно энергетически не экономично [58].

В настоящее время все более широкое применение получает регулирование температуры газа на выходе ABO за счет управления частотой вращения вентиляторов с использованием частотно – регулируемого привода [10, 16, 18, 19, 20, 22, 56, 59, 61, 62, 70, 73, 93, 94, 101]. В этом случае используются замкнутые по температуре газа на выходе УОГ системы автоматического управления (САУ), обеспечивающие требуемую точность стабилизации температуры газа, а также высокое качество переходного процесса при изменении уставки температуры.

Другим важнейшим достоинством регулирования температурного перепада за счет изменения частоты вращения вентиляторов является существенное повышение энергоэффективности работы установок охлаждения газа. В случае регулирования частоты вращения вентиляторов, как показано в [10, 16, 18, 94], температурный перепад изменяется пропорционально частоте вращения вентиляторов, а мощность на валу, как и для других механизмов с «вентиляторным» моментом, зависит от частоты вращения в третьей степени. Благодаря этому при работе УОГ с неполной нагрузкой и, соответственно, снижении частоты вращения вентиляторов достигается значительное уменьшение расхода электроэнергии на нужды охлаждения.

Основные недостатки САУ АВО газа определяются проблемами в области электромагнитной совместимости, связанные с тем, что ЧРП потребляет из питающей сети несинусоидальный ток. Эти проблемы решаются, как совершенствованием ЧРП, так и соответствующими решениями при проектировании систем электроснабжения компрессорных станций [30].

1.2 Аналитический обзор литературных источников по состоянию проблемы

Проблема разработки алгоритмов управления и реализующих их систем управления температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения газа (в литературе такие системы обычно называют САУ АВО газа, будем далее придерживаться этой терминологии) включает ряд задач.

Во-первых, САУ должна обеспечивать требуемую точность управления выходной переменной в установившихся и переходных процессах, вовторых, при синтезе таких систем должны накладываться ограничения на характер переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов в наиболее неблагоприятных режимах [1, 2, 6, 10].

Поясним последнее требование. В современных системах широко используется принцип подчиненного регулирования координат, обеспечивающий близкое к предельному быстродействие системы [66, 79, 95]. Это достигается за счет компенсации «больших» постоянных времени во внутренних контурах системы и ведет к форсированному изменению регулирующего воздействия на объект управления. Применительно к рассматриваемым САУ таким регулирующим воздействием является частота вращения вентиляторов. Форсирование переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов приводит к значительным динамическим нагрузкам на кинематическую часть установки и преждевременному выходу ее из строя. В этом случае теряется важнейшее свойство систем с частотно – регулируемым приводом – возможность плавного пуска механизма. В связи с изложенным, синтез САУ АВО газа должен выполняться с учетом дополнительных требований к показателям качества переходных процессов изменения частоты вращения вентиляторов.

Кроме того, при синтезе САУ должна учитываться нестационарность объекта управления. Известно, что параметры объекта управления САУ АВО

газа могут варьировать в достаточно широких пределах при изменении температуры наружного воздуха, режимов работы КС и др.

Остановимся на характеристике опубликованных работ, близких к решаемым в диссертации задачам.

В [48] рассмотрен установившийся режим работы ABO. Исследованы тепловые характеристики ABO, отмечено существенное влияние погрешности измерения температуры на точность определения тепловой эффективности ABO. Предложен способ аналитического описания так называемых лучевых характеристик ABO (указанные характеристики более подробно рассмотрены в разделе 2 настоящей работы), используемых для определения тепловой мощности аппарата. Приведены аналитические выражения для расчета тепловой мощности для нескольких типов аппаратов.

В [59, 96] исследуется задача оптимизации установившихся режимов работы участка магистрального газопровода. Отмечается, что основными оптимизируемыми параметрами в системах магистрального транспорта газа являются давление и температура газа на выходе КС. Предлагается в качестве критерия оптимизации при передаче газа по ряду последовательных КС рассматривать расход электроэнергии на сжатие, охлаждение и передачу газа. Построена математическая модель участка магистрального газопровода, учитывающая расход электроэнергии на все необходимые технологические операции. Предлагается методика решения оптимизационной задачи и отмечается сложность технической реализации предложенных алгоритмов управления ГПА и АВО газа.

В работах [22, 93] рассматривается замкнутая система управления температурой газа на выходе АВО. Отмечается, что параметры обобщенного объекта управления, включающего электропривод вентиляторов И теплообменник, могут варьироваться при изменении параметров внешней среды и расхода газа через АВО. Предложено использовать для управления объектом гибридный регулятор с нечеткой логикой. Показано, что его применение позволяет улучшить показатели качества процесса регулирования для выходной переменой – температуры газа. Вопросы обеспечения требуемого качества переходных процессов изменения частоты вращения вентиляторов, являющиеся весьма важными для подобных систем, при этом не обсуждаются, кроме того, не исследованы динамические характеристики системы при переключении регуляторов.

Вопросам экономии электроэнергии на нужды охлаждения газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов за счет использования частотно – регулируемого электропривода посвящено достаточно большое количество работ, в частности [10, 17, 18, 20, 21].

В работе [75] исследуются вопросы влияния загрязнения трубного и межтрубного пространства аппаратов воздушного охлаждения И теплообменников Представлены на тепловые характеристики ABO. исследований результаты экспериментальных аналитических И гидродинамического межтрубного метода очистки пространства теплообменников с целью повышения эффективности функционирования аппаратов.

Особенности наиболее часто используемой на компрессорных станциях магистральных газопроводов совместной работы параллельно включенных аппаратов воздушного охлаждения, работающих с общими коллекторами на входе и выходе, рассмотрены в [34]. Решается задача расчета обобщенных показателей работы узла воздушного охлаждения газа в стационарном режиме. С использованием уравнения Шухова подробно исследована энергетическая эффективность работы ABO газа с двумя включенными вентиляторами и с одним включенным вентилятором.

Исследованию САУ АВО газа посвящена работа [61]. Отмечаются особенности условий эксплуатации АВО газа на дожимных компрессорных станциях газовых промыслов и КС МГ: на компрессорные станции магистральных газопроводов поступает уже осушенный газ, в то время как на газовых промыслах на первой ступени компримирования приходится охлаждать сырой газ до осушки, что может приводить к образованию

гидратов углеводородных газов на внутренних поверхностях нижних рядов газа. теплообменных трубок ABO Рассмотрены известные методы управления температурой газа на выходе АВО. Обосновано предлагается ключевым критерием качества работы САУ АВО газа считать стабильность заданных характеристик технологического процесса. Приводится описание разработанной системы, отличающейся использованием одного частотного преобразователя на четыре двигателя вентиляторов, что обеспечивает экономию капитальных затрат. Рассмотрена возможность плавного пуска каждого двигателя вентиляторов с последующим переключением на сеть.

В [62] рассмотрена общая функциональная схема САУ АВО газа без конкретизации статических и динамических характеристик отдельных звеньев. Отмечается, что задача управления осложняется отсутствием оценки воздействия внешней и внутренней среды в полном объеме. Авторами предлагается использование в структурной схеме управления АВО газа блока искусственных нейронных сетей с выводом данных по управлению электротехническим комплексом (АВО газа), а также для прогнозирования потребления электроэнергии на нужды охлаждения.

Задача разработки оптимальной по критерию быстродействия САУ температурой на выходе ABO газа с учетом ограничения скорости исполнительного органа электропривода и без ограничения скорости исполнительного органа электропривода ставится в работе [87]. Задача решается за счет установки на входе системы достаточно сложных задатчиков интенсивности, реализующих две рациональные диаграммы изменения температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения. Вопросы влияния нестационарности объекта управления на стабильность характеристик системы при этом не обсуждаются.

Использование частотно – регулируемого электропривода вентиляторов аппаратов охлаждения газа связано с необходимостью исследования их влияния на показатели качества электроэнергии. Эта проблема рассмотрена в [30]. Отмечается, что при типовой схеме системы

электроснабжения газотурбинных КС питание ЧРП вентиляторов установок охлаждения газа осуществляется обычно от отдельного трансформатора комплектной трансформаторной подстанции. При этом подстанция становится потребителем несинусоидального тока, что в конечном счете может привести к нарушению условий электромагнитной совместимости. В работе на основе вычислительных экспериментов дается прогноз о качестве электроэнергии с учетом типа источника питания, а также предложены меры по снижению уровня высших гармоник в кривой тока и напряжения, обусловленных подключением ЧРП вентиляторов.

В [70] исследуется инвариантная система управления АВО газа, КС работающей В условиях неизменной пропускной способности газопровода. Предложено решение повышения магистрального задачи энергетической эффективности газотурбинных КС за счет совершенствования алгоритмов управления ЧРП АВО газа с использованием искусственной нейронной сети для решения задачи прогнозирования потребления электроэнергии. Рассмотрена общая схема системы управления температурой автоматического на выходе аппаратов воздушного охлаждения газа, использующая блок задания включения, регулирования скорости вращения отключения И электроприводов вентиляторов с учетом сигналов датчиков изменения внешних воздействий, поступающих на вход блока искусственных нейронных сетей. Утверждается, что такая структура позволяет более эффективно использовать топливноэнергетические ресурсы. Основное внимание уделено прогнозированию потребления электроэнергии аппаратами воздушного охлаждения И сравнительному экономическому анализу вариантов построения системы с дискретным регулированием и регулированием с использованием различного количества частотных преобразователей для питания двигателей вентиляторов.

Вопросы повышения энергетической эффективности режимов работы установок охлаждения газа, разработки алгоритмов и САУ АВО газа

рассмотрены в [2, 6, 7, 8, 10, 13, 38, 39, 40, 41, 56].

В [10] исследованы стационарные режимы работы ABO газа, на основе экспериментальных исследований показано, что температурный перепад на ABO линейно зависит от частоты вращения вентиляторов. Рассмотрена и решена задача оптимизации режимов работы ABO с учетом отличия коэффициентов передачи по управляющему воздействию для первого и второго вентиляторов ABO. Задача синтеза САУ ABO рассмотрена с учетом требований к качеству переходных процессов изменения частоты вращения вентиляторов, однако вопросы обеспечения стабильных показателей качества управления с учетом широкого диапазона изменения параметров объекта решены не в полном объеме. В работах [7, 10, 13] также показано, что наибольшая экономия электроэнергии достигается в случае совместного управления всеми имеющимися на установке охлаждения ABO по сравнению с вариантом перевода части вентиляторов в «базовый» режим работы с номинальной частотой вращения.

Вопросы разработки описания процессов математического теплообмена в АВО в стационарных режимах с учетом распределенности объекта управления рассмотрены в [13, 14, 39, 40, 56]. В [56] предложена комбинированная система управления аппаратами воздушного охлаждения, содержащая дискретную И непрерывную части. Дискретная часть включение/отключение ABO отдельных с осуществляет учетом неидентичности их тепловых характеристик и взаимного влияния. Часть аппаратов управляется замкнутой системой управления с частотно – регулируемым приводом вентиляторов, что обеспечивает необходимую точность стабилизации температуры газа. Вопросам обеспечения требуемой точности управления в условиях вариаций параметров объекта управления уделено недостаточное внимание.

Выводы по разделу

Приведенный обзор литературных источников свидетельствует, что

ряд вопросов совершенствования алгоритмов управления и САУ АВО газа с учетом специфических требований объекта управления до настоящего времени остается открытым, что определяет актуальность диссертационной работы.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Общие сведения об объекте управления

Разработка математической модели объекта управления является одной из важнейших первоочередных задач при автоматизации технологического процесса. Достоверная математическая модель необходима не только для последующего проведения синтеза системы управления, но и позволяет обосновать рациональные области применения разрабатываемой системы.

При разработке САУ аппаратами воздушного охлаждения газа в качестве объекта управления рассматривался обобщенный объект, включающий аэродинамические процессы и процессы теплообмена в АВО.

Рассматриваемый объект, как показано в [56], в общем случае следует рассматривать как нелинейный объект с распределенными параметрами.

Конкретизируем характеристику объекта применительно к более частной задаче построения САУ температурой газа на выходе АВО.

Выходной регулируемой переменной ОУ является температура газа $\theta_{вых}$ на выходе ABO. При расчетах системы, в ряде случаев, удобнее рассматривать не температуру $\theta_{выx}$, а изменение (приращение) температуры газа при прохождении через аппарат:

$$\Delta \theta = \theta_{\rm BX} - \theta_{\rm BMX},\tag{2.1}$$

где $\theta_{\rm BX}$ – температура газа на входе в ABO.

Температура газа на выходе ABO и ее приращение зависят от температуры газа на входе теплообменника, температуры наружного воздуха, расхода газа через теплообменник, скорости или расхода воздуха, создаваемых вентилятором, влажности воздуха и ряда других менее значимых параметров. Частота вращения вентиляторов является регулирующем воздействием на объект, причем, как показано в [10], скорость и расход охлаждающего воздуха приближенно линейно связаны с частотой *n* вращения вентиляторов. Изменение регулирующего воздействия на объект осуществляется с помощью ЧРП, путем изменения частоты f и напряжения U на статоре электродвигателя.

Для работы САУ АВО газа характерно небольшое изменение входных и выходных переменные вблизи рабочей точки, то есть режим работы при «малых» отклонениях. Характеристики объекта на конечных интервалах рабочего диапазона могут с достаточной точностью считаться линейными. С учетом этого, рассматриваемый объект может быть отнесен к классу так называемых квазилинейных.

В то же время для исследуемого объекта управления характерно значительное изменение параметров рабочей точки в зависимости от значений переменных, которые следует рассматривать как возмущающие воздействия. Основным возмущением следует считать изменение температуры наружного воздуха. Влияние этого возмущения на коэффициент передачи объекта можно оценить по тепловым характеристикам аппарата воздушного охлаждения, приведенным на рисунке 2.1.

Поясним использование номограммы для нахождения коэффициента передачи объекта управления. Исходными данными для ее использования являются температура газа t_1 на входе АВО, температура наружного воздуха τ_1 и расход газа *G* через ABO. Например, при $t_1 = 31^{\circ}$ C, $\tau_1 = 0^{\circ}$ C и G = 62 кг/c рассчитывают $t_1 - \tau_1 = 31^{\circ}\text{C}$, по номограмме находят точку пересечения линии расхода G = 62 кг/с с кривой $t_1 - \tau_1 = 31^{\circ}$ C. Опуская из пересечения указанных линий точки перпендикуляр, получают температурный перепад (глубину охлаждения газа) на ABO $\Delta \Theta \approx 16^{\circ}$ C. Полученный температурный перепад достигается в указанных условиях при номинальной частоте вращения вентиляторов.

Как показано в [10], при регулировании скорости вентиляторов температурный перепад линейно связан со скоростью потока охлаждающего воздуха и частотой вращения вентиляторов.



Рисунок 2.1 – Номограмма для теплового расчета аппарата воздушного охлаждения газа 2АВГ – 75

Тогда коэффициент передачи объекта управления можно определить как

$$k_{\rm o} = \frac{\Delta \theta_{\rm BMX}}{f_{\rm HOM}}, \, {^{\circ}\rm C}/_{\Gamma \rm II},$$
(2.2)

где $f_{\text{ном}}$ – номинальная частота напряжения на выходе частотного преобразователя ЧРП.

Из последнего выражения следует, что вариации коэффициента передачи объекта управления определяются вариациями температурного перепада $\Delta \theta_{вых}$ на ABO при изменении внешних условий. Для оценки пределов изменения температурного перепада были рассмотрены два «крайних» режима: режим работы с минимальным температурным перепадом и режим работы с максимальным температурным перепадом.

В обоих режимах температура газа на входе в АВО принята t_1 =31°С. Для первого режима разность температуры газа на входе в АВО и температуры наружного воздуха принята $t_1 - \tau_1 = 12$ °С (при меньших значениях ($t_1 - \tau_1$) АВО отключают ввиду неэффективности охлаждения). Расход газа принят равным G = 80 кг/с. В этих условиях температурный перепад, найденный по номограмме (рисунок 2.1), минимален и составляет $\Delta \theta_{выхmin} = 4$ °С.

Для второго режима разность температуры газа на входе в ABO и температуры наружного воздуха принята $t_1 - \tau_1 = 60^{\circ}$ C. Расход газа G = 60 кг/с. В этих условиях температурный перепад, найденный по номограмме (рисунок 2.1), максимален и составляет $\Delta \theta_{выхmax} = 30^{\circ}$ C.

Для рассмотренных «крайних» режимов температурные перепады на АВО и соответственно коэффициент передачи объекта изменяются почти в 8 раз.

Таким образом, диапазон вариаций коэффициента передачи объекта управления определяется в значительной мере температурными перепадами наружного воздуха, которые в свою очередь зависят от климатического региона расположения КС. Кроме того, диапазон вариаций коэффициента передачи ОУ зависит от режима работы КС по производительности. Если принять, что КС работает по производительности в режиме близком к номинальному в климатическом поясе с умеренным климатом, то, как показывает анализ, коэффициент передачи объекта изменяется не более, чем в 3...4 раза.

В случае работы КС в климатическом поясе с континентальным климатом с переменной производительностью максимальное значение диапазона вариаций коэффициента передачи ОУ может составлять 8...10.

С учетом изложенного исследуемый объект управления следует считать нестационарным. При оценке возможного диапазона вариаций параметров объекта управления и анализе работы САУ необходимо учитывать предполагаемые режимы работы и местоположение КС. При разработке математических моделей объектов управления используется как аналитический подход, так и экспериментальные методы.

[56], При аналитическом исследовании учитывая изменении температуры по длине теплообменника, АВО газа рассматривается как объект с параметрами описывается распределенными И системой дифференциальных уравнений в частных производных. При этом возникает необходимость рассмотрения таких промежуточных переменных, как средняя по сечению температура газа, температура стенки трубы, а также учета аксиальной координаты газового потока, радиальной координаты стенки трубы, скорости газового потока, коэффициента теплообмена между потоком газа и стенкой трубы, теплоёмкости и плотности газа, коэффициента температуропроводности материала трубы, коэффициента теплообмена между внешней поверхностью оребренной трубы и воздушным потоком, геометрических параметров АВО.

Кроме того, с учетом многорядности расположения труб в аппарате, необходимо рассматривать характер изменения температуры воздуха после прохождения каждого ряда оребрённых труб теплообменного аппарата. В результате даже для установившегося режима аналитическое определение параметров модели из-за сложности достоверного нахождения некоторых параметров процесса становится затруднительным.

Результаты аналитических и экспериментальных исследований [2, 10, 22, 56] показывают, что для «малых» отклонений переменных и принятых в данной работе входных и выходных координат динамические свойства обобщенного объекта управления могут быть описаны передаточной функцией апериодического звена первого порядка. В общем случае объект управления дополнительно содержит «малые» постоянные времени, в результате передаточная функция объекта будет эквивалентна апериодическому звену второго порядка.

В связи со сложностью аналитического определения параметров объекта в работе проведена параметрическая идентификация объекта

управления на основе экспериментальных исследований.

2.2 Экспериментальное исследование характеристик объекта управления

Экспериментальные исследования проведены для аппаратов воздушного охлаждения газа типа $2AB\Gamma - 75$, с ЧРП вентиляторов на основе преобразователей частоты «ABBAC550» [67, 68]. Температура наружного воздуха во время экспериментов составляла 3,5°С, расход газа через ABO 222 000 м³/час. Температура газа на входе и выходе ABO измерялась с помощью датчиков (термопреобразователей с унифицированным выходным сигналом) Метран-270, установленных во входном и выходном коллекторах ABO. При проведении экспериментов создавалось ступенчатое изменение задающего сигнала на входе ЧРП и фиксировались показания датчиков температуры на входе и выходе ABO.

График переходного процесса, полученный при ступенчатом изменении уставки частоты *f* ЧРП с 20 Гц на 30 Гц, приведен на рисунке 2.2. Экспериментальные данные для его построения приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса изменения сигнала на выходе датчика температуры при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 20 Гц на 30 Гц

<i>t</i> , мин	$\Theta_{\text{вых}\cdot d},^{\circ}C$	$\Theta_{\text{bx}},^{\circ}C$	ΔΘ,°C	$h_{\mathfrak{I}}^{*}(t)$	$h_{\mathrm{a2}}^{*}(t)$	Δ
0	18,1	31,2	3,25	1,0	1,0	0,000
1	17,4	31,2	2,55	0,8	0,8	0,001
2	16,4	31,2	1,55	0,5	0,5	-0,005
3	15,7	31,2	0,85	0,3	0,3	-0,031
4	15,4	31,2	0,55	0,2	0,2	-0,008
5	15,2	31,2	0,35	0,1	0,1	0,000
6	15	31,2	0,15	0,0	0,1	-0,019
7	15	31,2	0,15	0,0	0,0	0,007
8	14,9	31,2	0,05	0,0	0,0	-0,009
9	14,9	31,2	0,05	0,0	0,0	0,001
10	14,9	31,1	0,05	0,0	0,0	0,007

Задача заключается в определении параметров объекта по

экспериментально полученным переходным процессам.



Рисунок 2.2 – Переходный процесс изменения сигнала на выходе датчика температуры при изменении уставки частоты *f* с 20 Гц на 30 Гц

В структурную схему звеньев цепи (рисунок 2.3) по снятию динамических характеристик входят ЧРП, собственно объект управления и датчик температуры.



Рисунок 2.3 – Структурная схема звеньев цепи по снятию динамических характеристик

Динамические свойства электропривода, как показывают результаты анализа, можно приближенно описать передаточной функцией (ПФ) апериодического звена

$$W_E(p) = \frac{\Delta n(p)}{\Delta f(p)} = \frac{k_E}{T_E p + 1},$$
(2.3)

где Δn – приращение частоты вращения электродвигателей вентиляторов; Δf – приращение уставки частоты ЧРП; p – оператор Лапласа; k_E и T_E - коэффициент передачи и постоянная времени ЧРП.

Постоянная времени T_E почти на 2 порядка меньше постоянной времени объекта. В связи с этим, далее инерционность электропривода не учитывалась, то есть считалось, что при подаче ступенчатого воздействия на вход электропривода (изменения уставки частоты f) на вход исследуемого объекта поступает ступенчатый сигнал.

Датчик температуры газа на выходе ABO имеет определенную инерционность. По данным ряда исследований динамические свойства датчика температуры могут быть описаны ПФ апериодического звена

$$W_D(p) = \frac{\Delta \theta_{\text{вых.д}}(p)}{\Delta \theta_{\text{вых}}(p)} = \frac{k_D}{T_D p + 1},$$
(2.4)

где $\theta_{\text{вых.д}}$, $\theta_{\text{вых}}$ – сигнал на выходе датчика температуры (имеет размерность температуры и соответственно $k_D = 1$) и температура на выходе ABO соответственно.

Постоянная времени датчика по литературным данным составляет примерно $T_D \approx 10 \dots 20$ с.

При последующем анализе было принято, что передаточная функция объекта совместно с электроприводом описывается выражением

$$W_{\rm o}(p) = \frac{\Delta \theta_{\rm Bbix}(p)}{\Delta f(p)} = -\frac{k_{\rm o}}{(T_{\rm o}p+1)},$$
 (2.5)

где *T*_o-постоянная времени обобщенного объекта управления.

Знак минус в последнем выражении отражает то обстоятельство, что положительному приращению частоты вращения двигателей вентиляторов соответствует отрицательное приращение температуры газа на выходе ABO.

Таким образом, эквивалентная ПФ цепи, показанной на рисунке 2.3, имеет вид

$$W_{9}(p) = \frac{\Delta \theta_{\text{вых.},\text{д}}(p)}{\Delta f(p)} = -\frac{k_{0}}{(T_{0}p+1)(T_{D}p+1)}.$$
(2.6)

Определение коэффициента передачи объекта не вызывает затруднений,

$$k_{\rm o} = \frac{\Delta \theta_{\rm Bbix,d.yct}}{\Delta f}, \ \Delta \theta_{\rm Bbix,d.yct} = \theta_{\rm Bbix,d.yct} - \theta_{\rm Bbix,d.o},$$
 (2.7)

где $\theta_{\text{вых.д.уст}}$ и $\theta_{\text{вых.д.o}}$ – установившееся значение выходного сигнала датчика температуры и значение сигнала в начальный момент времени переходного процесса.

Для последующего анализа экспериментальных данных целесообразно принять нулевые начальные условия – рассматривать приращение переменных

$$\Delta \theta_{\rm BMX, d} = \theta_{\rm BMX, d} - \theta_{\rm BMX, d, o} \tag{2.8}$$

и использовать нормированное значение приращения выходного сигнала датчика, определив его в виде

$$h = \frac{\Delta \theta_{\text{Bbix},\text{d}}}{\Delta \theta_{\text{Bbix},\text{d},\text{yct}}}.$$
(2.9)

Аналитическое выражение для переходного процесса при нулевых начальных условиях – переходной функции объекта, имеющего передаточную функцию (2.6), при выполнении условия $T_0 \neq T_D$ для положительного приращения частоты *f* будет [66]:

$$h_{\rm a}(t) = -\left[1 - \frac{T_{\rm o}}{T_{\rm o} - T_D} \exp\left(-\frac{t}{T_{\rm o}}\right) + \frac{T_D}{T_{\rm o} - T_D} \exp\left(-\frac{t}{T_D}\right)\right].$$
 (2.10)

Задача сводится к определению T_0 по экспериментально полученной переходной характеристике $h_9(t)$.

Существуют различные методы определения постоянных времени по переходной характеристике объекта [42, 80], в частности, метод Ольденбурга и Сарториуса, методы Орманна. Они основаны на графо – аналитических расчетах, включающих достаточно субъективные элементы локализации

точки перегиба переходной характеристики. Их точность и надежность определения динамических характеристик объекта может быть недостаточно высокой, особенно в условиях наличия шумов в измеряемом сигнале и конечной точности их измерения.

В диссертационной работе при обработке экспериментальных данных учитывалось, что постоянная времени датчика температуры T_D априори известна. Для определения постоянной времени объекта экспериментальные данные, полученные для переходных характеристик, аппроксимировались экспоненциальной функцией с использованием электронных таблиц MS Excel. Аппроксимирующее выражение для экспоненциальной функции в MS Excel имеет вид

$$y = a \cdot \exp(bx). \tag{2.11}$$

В связи с этим экспериментальные нормированные значения переходной характеристики были преобразованы к аналогичному виду с использованием выражения

$$h_{\mathfrak{I}}^{*}(t) = 1 - |h_{\mathfrak{I}}(t)|.$$
 (2.12)

Преобразованная переходная характеристика $h_3^*(t)$ для переходного процесса, показанного на рисунке 2.2, приведена на рисунке 2.4. При ее построении начальный участок характеристики не учитывался, поскольку по данным предварительного анализа, известно, что постоянная времени объекта T_0 на порядок больше T_D , а при таком соотношении постоянных времени вид переходной характеристики на конечном участке определяется значением большей постоянной времени [42].

На этом же рисунке показана аппроксимирующая экспоненциальная кривая $h_a^*(t)$, а также значения параметров *a* и *b*, входящих в выражение (2.11) и коэффициент детерминации R^2 , характеризующих тесноту связи переменных. Согласно шкале Чеддока значения $R^2 = 0,7 \dots 0,9$ соответствуют высокому уровню связи, $R^2 = 0,90 \dots 0,99$ – весьма высокому.



Рисунок 2.4 – Преобразованная переходная характеристика при изменении уставки частоты *f* с 20 Гц на 30 Гц

На основании полученных данных вычислено значение постоянной времени $T_0 = -\frac{1}{b} = \frac{1}{0,498} = 2,01$ мин, и коэффициента передачи $k_0 = 0,32 \frac{{}^0C}{\Gamma_{II}}$. На заключительном этапе преобразованная экспериментальная переходная характеристика $h_3^*(t)$ сравнивалась с уточненной переходной характеристикой, рассчитанной по выражению

$$h_{a2}^{*}(t) = 1 - |h_{a}(t)|.$$
(2.13)

Здесь значения h_{a2} (*t*) рассчитывались по выражению (2.10) с учетом найденного значения T_0 и известного значения постоянной времени T_D , а также находилась указанная в таблице 2.1 погрешность аппроксимации

$$\Delta = h_{a2}^{*}(t) - h_{3}^{*}(t).$$
(2.14)

В ходе экспериментальных исследований были также получены переходные процессы для повышения уставки частоты ЧРП с 30 Гц на 40 Гц, 40 Гц на 50 Гц, и для случая понижения частоты. Результаты этих исследований приведены ниже. Обработка экспериментальных данных приводилась аналогично изложенному. При изменении частоты с 50 Гц на 40 Гц наблюдалось существенной изменение температуры на входе ABO, в связи с этим данные были отбракованы.



Рисунок 2.5 – Преобразованная экспериментальная $h_{3}^{*}(t)$ и уточненная аналитическая $h_{a2}^{*}(t)$ переходные характеристики при изменении уставки частоты f с 20 Гц на 30 Гц

Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 30 Гц на 40 Гц

Таблица 2.2 – Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса изменения сигнала на выходе датчика температуры при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 30 Гц на 40 Гц

<i>t</i> , мин	$\Theta_{\text{вых}\cdot d},^{\circ}C$	$\Theta_{\rm bx},^{\circ}{\rm C}$	ΔΘ,°C	$h_{\mathfrak{I}}^{*}(t)$	$h_{\mathrm{a2}}^{*}(t)$	Δ
0	14,3	31,2	2,15	1,00	1,000	0,000
1	13,8	31,2	1,65	0,77	0,903	-0,136
2	13,1	31,2	0,95	0,44	0,695	-0,253
3	12,6	31,2	0,45	0,21	0,529	-0,320
4	12,5	31,3	0,35	0,16	0,403	-0,240
5	12,5	31,2	0,35	0,16	0,306	-0,144
6	12,4	31,3	0,25	0,12	0,233	-0,117
7	12,4	31,2	0,25	0,12	0,178	-0,061
8	12,4	31,2	0,25	0,12	0,135	-0,019
9	12,4	31,2	0,25	0,12	0,103	0,013
10	12,3	31,2	0,15	0,07	0,078	-0,008
11	12,3	31,2	0,15	0,07	0,060	0,010
12	12,3	31,2	0,15	0,07	0,045	0,024
13	12,2	31,2	0,05	0,02	0,035	-0,011
14	12,2	31,3	0,05	0,02	0,026	-0,003



Рисунок 2.6 – Переходный процесс изменения сигнала на выходе датчика температуры при изменении уставки частоты *f* с 30 Гц на 40 Гц



Рисунок 2.7 – Преобразованная переходная характеристика при изменении уставки частоты *f* с 30 Гц на 40 Гц

На основании полученных данных вычислено значение постоянной времени $T_0 = -\frac{1}{b} = \frac{1}{0,273} = 3,64$ мин, и коэффициента передачи $k_0 = 0,21 \frac{{}^0C}{\Gamma_{\rm H}}$.



Рисунок 2.8 – Преобразованная экспериментальная $h_3^*(t)$ и уточненная аналитическая $h_{a2}^*(t)$ переходные характеристики при изменении уставки частоты f с 30 Гц на 40 Гц

Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 40 Гц на 50 Гц

Таблица 2.3 – Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса изменения сигнала на выходе датчика температуры при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 40 Гц на 50 Гц

<i>t</i> , мин	$\Theta_{\text{вых}\cdot d},^{\circ}C$	$\Theta_{\text{bx}},^{\circ}C$	ΔΘ,°C	$h_{\mathfrak{I}}^{*}(t)$	$h_{\mathrm{a2}}^{*}(t)$	Δ
0	12,3	31,2	1,25	1	1,000	0,000
1	11,9	31,2	0,85	0,68	0,645	0,035
2	11,4	31,2	0,35	0,28	0,354	-0,074
3	11,2	31,2	0,15	0,12	0,192	-0,072
4	11,1	31,2	0,05	0,04	0,105	-0,065
5	11,1	31,2	0,05	0,04	0,057	-0,017
6	11,1	31,2	0,05	0,04	0,031	0,009
7	11,1	31,2	0,05	0,04	0,017	0,023


Рисунок 2.9 – Переходный процесс изменения сигнала на выходе датчика температуры при изменении уставки частоты *f* с 40 Гц на 50 Гц



Рисунок 2.10 – Преобразованная переходная характеристика при изменении уставки частоты *f* с 40 Гц на 50 Гц

На основании полученных данных вычислено значение постоянной времени $T_0 = -\frac{1}{b} = \frac{1}{0,609} = 1,64$ мин, и коэффициента передачи $k_0 = 0,125 \frac{{}^0C}{\Gamma_{\rm H}}.$



Рисунок 2.11 –Преобразованная экспериментальная $h_3^*(t)$ и уточненная аналитическая $h_{a2}^*(t)$ переходные характеристики при изменении уставки частоты f c 40 Гц на 50 Гц

Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 40 Гц на 30 Гц

Таблица 2.4 – Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса изменения сигнала на выходе датчика температуры при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 40 Гц на 30 Гц

<i>t</i> , мин	Θ _{вых∙д} ,°С	$\Theta_{\rm bx},^{\circ}{\rm C}$	ΔΘ,°C	$h_{\mathfrak{I}}^{*}(t)$	$h_{a2}^{*}(t)$	Δ
0	12,5	31	2,15	1,000	1,000	0,000
1	13,2	31	1,45	0,674	0,739	-0,065
2	13,7	31	0,95	0,442	0,444	-0,002
3	14,1	31	0,55	0,256	0,264	-0,008
4	14,3	31	0,35	0,163	0,157	0,006
5	14,4	31,1	0,25	0,116	0,093	0,023
6	14,5	31,1	0,15	0,070	0,055	0,014
7	14,6	31,1	0,05	0,023	0,033	-0,010



Рисунок 2.12 – Переходный процесс изменения сигнала на выходе датчика температуры при изменении уставки частоты *f* с 40 Гц на 30 Гц



Рисунок 2.13 – Преобразованная переходная характеристика при изменении уставки частоты *f* с 40 Гц на 30 Гц

На основании полученных данных вычислено значение постоянной времени $T_0 = -\frac{1}{b} = \frac{1}{0.521} = 1,92$ мин, и коэффициента передачи $k_0 = 0,215 \frac{{}^0C}{\Gamma_{\rm H}}.$

39



Рисунок 2.14 –Преобразованная экспериментальная $h_3^*(t)$ и уточненная аналитическая $h_{a2}^*(t)$ переходные характеристики при изменении уставки частоты f c 40 Гц на 30 Гц

Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 30 Гц на 20 Гц

Таблица 2.5 – Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса изменения сигнала на выходе датчика температуры при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 30 Гц на 20 Гц

<i>t</i> , мин	$\Theta_{\text{вых-д}},^{\circ}C$	$\Theta_{\text{bx}},^{\circ}C$	ΔΘ,°C	$h_{\mathfrak{I}}^{*}(t)$	$h_{\mathrm{a2}}^{*}(t)$	Δ
0	14,6	31,1	3,45	1,000	1,000	0,000
1	15,3	31,1	2,75	0,797	0,688	0,109
2	16,4	31,1	1,65	0,478	0,352	0,127
3	17,2	31,1	0,85	0,246	0,177	0,070
4	17,7	31,1	0,35	0,101	0,089	0,013
5	17,9	31,1	0,15	0,043	0,044	-0,001
6	18	31,2	0,05	0,014	0,022	-0,008



Рисунок 2.15 – Переходный процесс изменения сигнала на выходе датчика температуры при изменении уставки частоты *f* с 30 Гц на 20 Гц



Рисунок 2.16 – Преобразованная переходная характеристика при изменении уставки частоты *f* с 30 Гц на 20 Гц

На основании полученных данных вычислено значение постоянной времени $T_0 = -\frac{1}{b} = \frac{1}{0,695} = 1,44$ мин, и коэффициента передачи $k_o = 0,34 \frac{{}^{0}C}{{}^{\Gamma_{II}}}$.



Рисунок 2.17 –Преобразованная экспериментальная $h_3^*(t)$ и уточненнаяаналитическая $h_{a2}^*(t)$ переходные характеристики при изменении уставки частоты f c 40 Гц на 30 Гц

Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 29,2 Гц на 0 Гц

Таблица 2.6 – Экспериментальные и расчетные данные переходного процесса изменения сигнала на выходе датчика температуры при ступенчатом изменении уставки частоты вращения ЧРП с 29,2 Гц на 0 Гц

<i>t</i> , мин	$\Theta_{{\scriptscriptstyle{\mathrm{B}}}{\scriptscriptstyle{\mathrm{b}}}{\scriptscriptstyle{\mathrm{X}}}\cdot\mathrm{J}},^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$	$\Theta_{\text{bx}},^{\circ}C$	Δ Ω ,°C	$h_{\mathfrak{I}}^{*}(t)$	$h_{\mathrm{a2}}^{*}(t)$	Δ
0	15,1	31,2	12,25	1,000	1,000	-0,333
1	16,1	31,2	11,25	0,918	0,835	0,026
2	18,9	31,1	8,45	0,690	0,515	0,024
3	21,9	31,2	5,45	0,445	0,312	0,015
4	24	31,1	3,35	0,273	0,189	0,009
5	25,4	31,2	1,95	0,159	0,115	0,005
6	26,2	31,2	1,15	0,094	0,070	0,003
7	26,6	31,2	0,75	0,061	0,042	0,002
8	27	31,2	0,35	0,029	0,026	0,001
9	27,2	31,2	0,15	0,012	0,016	0,001
10	27,3	31,2	0,05	0,004	0,009	0,000



Рисунок 2.18– Переходный процесс изменения сигнала на выходе датчика температуры при изменении уставки частоты *f* с 29,2 Гц на 0 Гц



Рисунок 2.19 – Преобразованная переходная характеристика при изменении уставки частоты *f* с 29,2 Гц на 0 Гц

На основании полученных данных вычислено значение постоянной времени $T_0 = -\frac{1}{b} = \frac{1}{0,501} = 2,00$ мин, и коэффициента передачи $k_0 = 0,41 \frac{{}^0C}{\Gamma_{\rm H}}$.



Рисунок 2.20 –Преобразованная экспериментальная $h_3^*(t)$ иуточненная аналитическая $h_{a2}^*(t)$ переходные характеристики при изменении уставки частоты f с 29,2 Гц на 0 Гц

Результаты обработки 8-ми реализаций переходных характеристик по описанной методике показывают, что наибольшие отклонения аппроксимирующих зависимостей от экспериментальных в основном не превышают 10%, при этом среднее значение коэффициента передачи объекта управления составляет $k_o = 0.26 \ {}^{\circ}C/_{\Gamma_{II}}$, а постоянной времени $T_o = 2$ мин.

Выводы по разделу

На основе экспериментальных исследований проведена параметрическая идентификация аппарата воздушного охлаждения газа как объекта управления. Найдены коэффициент передачи и постоянная времени обобщенного объекта управления для конкретных условий.

На основе анализа тепловых характеристик ABO показано, что диапазон вариаций коэффициента передачи объекта управления при примерно постоянной производительности КС в регионах с умеренным

44

климатом составляет 3...4. Для КС, расположенных в климатических зонах с континентальным климатом и работающих с изменяющейся в 1,5...2 раза производительностью, диапазон вариаций коэффициента возрастает до 8...10.

З ИССЛЕДОВАНИЕ САУ АВО ГАЗА ТРАДИЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ

3.1 Характерные особенности САУ АВО газа

Достижение высокого качества управления в рассматриваемой САУ дополнительно осложняется инерционность датчика обратной связи и вариациями коэффициента передачи объекта управления (ОУ). Как показывает анализ, коэффициент передачи объекта является функцией температуры и влажности наружного воздуха, расхода газа через ABO, температуры газа на входе в ABO, угла атаки лопастей вентиляторов, других менее существенных факторов и может меняться в широких пределах [25, 28, 33, 48, 49, 50, 53, 58, 59,65, 90, 98, 99].САУ температурой газа имеет ряд специфических особенностей, которые должны учитываться при ее проектировании.

1) Характерной особенностью рассматриваемой САУ является достаточно медленное изменение основного возмущающего воздействия – изменение температуры наружного воздуха. В связи с этим синтез регуляторов целесообразно вести ориентируясь на показатели качества переходных процессов по задающему *U*₃ воздействию.

2) Кроме переходного процесса по температуре, для рассматриваемой САУ важное значение имеет качество переходного процесса для регулирующего воздействия на объект – частоты вращения вентиляторов. Для указанного процесса недопустимо значительное перерегулирование, т.к. оно приводит к дополнительным динамическим воздействиям на механическую часть вентиляторов.

3) Параметры объекта управления синтезируемой САУ могут варьироваться в достаточно широких пределах. В связи с этим при синтезе системы управления необходимо учитывать нестационарность объекта управления.

Как отмечается в литературе, например [66], при проектировании технических систем управления математическая модель объекта или её параметры, а также информация о внешней среде, как правило, известны лишь приближённо с той или иной степенью достоверности. Поэтому, в частности оптимальные системы, синтезированные по среднеквадратичным критериям, не являются грубыми и в некоторых случаях могут терять не только оптимальность, но и работоспособность при изменении условий функционирования. Указанные обстоятельства определили значительный интерес к развитию теории, так называемого, робастного (грубого) управления. Основная идея робастного управления заключается в том, что с помощью одного регулятора должна быть обеспечена устойчивость и качества регулирования САУ в необходимые показатели условиях неопределенности математической модели и действующих на систему возмущений.

При синтезе таких систем предполагается, что информация об объекте и внешней среде известна не точно, а задана лишь с некоторой достоверностью. Достоверность при этом задается интервалами принадлежности (классами неопределенности).

Для учета влияния вариаций параметров объекта и возможных неточностей информации о коэффициентах передачи и постоянных времени объекта, электропривода и датчика температуры зададим соответствующим образом параметры функционально необходимых элементов системы. В [66] предложено разделять множество неопределённостей объекта на структурную и неструктурную.

В случае структурной неопределенности предполагается, что известно математическое описание объекта, причем параметры известны с точностью до принадлежности к некоторым интервалам.

Следуя такой классификации, объект управления в исследуемой САУ можно считать имеющим структурную неопределенность.

Функционально необходимыми элементами системы являются объект

управления, электропривод и датчик обратной связи.

Математическая модель объекта управления, как показали результаты экспериментальных исследований, может быть задана в виде класса динамических объектов, описываемых дифференциальным уравнением первого или второго порядка. ПФ объекта может быть записана в виде апериодического звена первого или второго порядка, причем в последнем случае одна из постоянных времени существенно меньше второй. Отнесем обе модели к одному классу, задав соответствующим образом интервалы изменения параметров объекта

$$W_{\rm o}(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta f(p)} = -\frac{k_{\rm o}}{(T_{\rm o}p+1)(T_{\rm o1}p+1)},$$
 (3.1)

$$T_{\text{omin}} \le T_{\text{o}} \le T_{\text{omax}}; \quad 0 \le T_{\text{o}1} \le T_{\text{o}1max}; \quad k_{\text{omin}} \le k_{\text{o}} \le k_{\text{omax}}.$$
(3.2)

Аналогично зададим математическую модель электропривода [60]

$$W_E(p) = \frac{k_E}{T_E p + 1},\tag{3.3}$$

$$T_{Emin} \le T_E \le T_{Emax} \tag{3.4}$$

и датчика обратной связи

$$W_D(p) = \frac{k_D}{T_D p + 1},$$
 (3.5)

$$T_{Dmin} \le T_D \le T_{Dmax}. \tag{3.6}$$

В связи с тем, что САУ АВО газа могут работать в различных условиях, определяющих диапазон возможных вариаций параметров объекта управления, задачу представляется целесообразным решать на основе сравнения различных вариантов построения системы. При этом требуется рассматривать комплекс показателей (критериев) качества,

В работе применен следующий подход: на первом этапе для получения обозримых аналитических результатов используется упрощённая модель объекта в виде апериодического звена первого порядка. Синтез регуляторов

ведется для номинальных (эталонных) параметров элементов САУ (для номинальной САУ) на основе требований к показателям качества переходного процесса по задающему воздействию. На втором этапе, с помощью компьютерного эксперимента, оценивается влияние вариаций параметров моделей на показатели качества процесса регулирования при детерминированных воздействиях.

В данном разделе рассмотрены системы традиционной структуры. Они могут выполняться в виде одноконтурных САУ или многоконтурных с использованием принципа подчиненного регулирования координат. Регуляторы в таких системах включаются последовательно в прямой цепи САУ.

3.2 Одноконтурная САУ АВО газа с ПИД-регулятором в прямой цепи и апериодическим фильтром на входе

Для последующего сравнения различных структур САУ обозначим для краткости рассматриваемую систему – вариант 1.

Исследование такой системы выполнено при участии автора в работе [2].

3.2.1 Синтез регулятора

На алгоритмической схеме предлагаемой системы (рисунок 1), динамические свойства отдельных элементов для приращения переменных отражены соответствующими передаточными функциями (ПФ): $W_0(p)$ – обобщенного объекта управления, выходной переменной которого является температура газа на выходе θ , а входной – частота вращения вентиляторов f; $W_E(p)$ – ЧРП вентиляторов; $W_D(p)$ – датчика температуры газа на выходе ABO; $W_R(p)$ – регулятора.



Рисунок 3.1 – Структурная схема одноконтурной САУ

На этапе синтеза будем рассматривать номинальные объект, электропривод и датчик, динамические свойства которых определены ПФ:

$$W_{o}(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta f(p)} = -\frac{k_{o}}{T_{o}p+1};$$
$$W_{E}(p) = -\frac{k_{E}}{T_{E}p+1};$$
$$W_{D}(p) = \frac{k_{D}}{T_{D}p+1},$$

где k_o , k_E , k_D , T_o , T_E , T_D – коэффициенты передачи и постоянные времени ОУ, ЧРП и датчика, соответственно;

р –оператор Лапласа.

Знак минус коэффициента передачи объекта отражает тот факт, что положительное приращение частоты вращения вентиляторов дает отрицательное приращение температуры газа на выходе АВО. При этом для соблюдения смысла регулирования коэффициент передачи электропривода (или регулятора) задается со знаком минус. То есть отрицательному приращению сигнала на входе электропривода соответствует увеличение частоты вращения. Тогда в случае увеличения температуры газа на выходе АВО сигнал на выходе датчика температуры увеличивается, сигнал ошибки становится отрицательным, а частота вращения вентиляторов получает положительное приращение, т.е. увеличивается, что в конечном итоге приводит к ликвидации отклонения температуры газа на выходе АВО.

Для синтеза регуляторов приняты упрощенные выражения для ПФ объекта управления и электропривода. Как показал анализ, использование упрощенных ПФ по сравнению с уточненными не приводит к существенным погрешностям в оценке показателей качества регулирования. При этом уточнения могут быть сделаны на заключительном этапе сравнительного анализа показателей качества регулирования, достигаемого в различных вариантах систем.

ПФ исходной системы (до введения регулятора) без учета знака в разомкнутом состоянии имеет вид

$$W_P(p) = \frac{k_0 k_E k_D}{(T_E p + 1)(T_0 p + 1)(T_D p + 1)}.$$
(3.7)

Выбор регулятора системы ведется на основе общей методики синтеза регуляторов с использованием стандартных (эталонных) передаточных функций [66, 79, 95]. В качестве «малой» постоянной времени здесь может рассматриваться постоянная времени T_E электропривода. Для стандартной настройки внутреннего контура на модульный оптимум выбран пропорционально – интегрально – дифференциальный регулятор с ПФ

$$W_{R1}(p) = \frac{(T_{R1}p+1)(T_{R2}p+1)}{T_{R3}p}.$$
(3.8)

При этом параметры регулятора выбраны из условий

$$T_{R1} = T_0; \ T_{R2} = T_D; \ T_{R3} = 2k_{01}k_Ek_DT_E,$$
 (3.9)

где k_{o1} – расчетное (эталонное) значение коэффициента передачи ОУ.

Использование такого регулятора позволяет скомпенсировать «большие» постоянные времени T_0, T_D ОУ и датчика обратной связи и получить ПФ контура в разомкнутом состоянии в виде

$$W_{\rm P}(p) = \frac{k_{\rm o}k_E k_D}{T_{R3}p(T_E p + 1)}.$$
(3.10)

ПФ замкнутого контура для выходной переменной – температуры газа

на выходе АВО с выбранным регулятором имеет вид

$$W_{z}^{\theta}(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta U_{3}(p)} = \frac{(T_{D}p+1)}{k_{D}(2T_{E}^{2}p^{2}+2T_{E}^{2}p+1)} \approx \frac{(T_{D}p+1)}{k_{D}(2T_{E}^{2}p+1)}.$$
(3.11)

Как следует из приведенного выражения, ПФ замкнутой системы содержит форсирующее звено в числителе, что приводит к значительному перерегулированию. Для его компенсации на входе одноконтурной системы необходимо ввести дополнительное апериодическое звено с ПФ

$$W_{f1}(p) = \frac{1}{T_D p + 1}.$$
(3.12)

3.2.2 Исследование показателей качества регулирования температуры газа для задающего воздействия

При моделировании динамических характеристик САУ для общности получаемых результатов постоянные времени и текущее время выражались в относительных единицах (о.е.). За базовое значение времени с учетов результатов экспериментального исследования (раздел 2) было принято значение постоянной времени объекта управления $T_0 = 120$ с. Соответственно значение постоянной времени объекта в относительных единицах $T_0^* = 1$. В дальнейших расчетах приняты характерные для рассматриваемой САУ относительные значения постоянных времени $T_E^* = 0,01; T_D^* = 0,1;$ время в относительных единицах $t^* = t/T_0$.

Для оценки влияния вариаций коэффициента передачи объекта на показатели качества регулирования также используется относительное значение

$$k_0^* = \frac{k_0}{k_{01}},\tag{3.13}$$

где k_0, k_{01} – фактическое и расчетное значение коэффициента передачи объекта, соответственно.

В одноконтурной системе с дополнительным апериодическим звеном на входе при расчетном значении коэффициента передачи ОУ переходный процесс по управляющему воздействию для выходной переменной – температуры газа на выходе ABO (кривая 1 на рисунке 3.2) имеет незначительное перерегулирование, время переходного процесса составляет в относительных единицах 0,04.

Здесь и при дальнейшем анализе будем дополнительно оценивать показатели качества переходного процесса при вариациях коэффициента передачи и постоянной времени объекта. Причем полагаем, что при настройке системы в качестве эталонного значения коэффициента передачи объекта принимается k_{o1} ($k_o^* = 1$). Соответственно, при вариациях, прежде всего температуры охлаждающего воздуха, а также расхода газа возможно как уменьшение, так и увеличение коэффициента передачи объекта.

Графики переходных процессов для выходной координаты – температуры газа на выходе ABO при эталонном (номинальном) значении коэффициента передачи объекта и его уменьшении в 5 раз (кривая 2) приведены на рисунке 3.2. Показатели качества переходных процессов указаны в таблице 3.1.

<i>k</i> _o [*] , o.e.	$t_{\rm p}^{*}$, o.e.	σ, %
0,2	0,27	0
0,4	0,13	0
1,0	0,04	4,3
2,0	0,05	16,6

Таблица 3.1 – Показатели качества переходных процессов

Как следует из приведенных данных, уменьшение коэффициента передачи объекта ведет к существенному возрастанию времени переходного процесса.

На рисунке 3.3 приведены графики переходных процессов изменения температуры газа для случая возрастания коэффициента передачи объекта в 2 раза – перерегулирование в системе при этом возрастает (показатели качества переходного процесса приведены в таблице 3.1).



Рисунок 3.2 – Графики переходных процессов изменения температуры газа на выходе САУ при ступенчатом изменении задающего U₃ сигнала: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=0,2$



Рисунок 3.3 – Графики переходных процессов изменения температуры газа на выходе САУ при ступенчатом изменении задающего U₃ сигнала: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=2$

Дополнительно проанализированы показатели качества переходных процессов при вариациях постоянной времени объекта. Соответствующие данные приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Показатели качества переходных процессов при вариациях постоянной времени объекта

$T_{\rm o}^{*}$, o.e.	$t_{\rm p}^*$, o.e.	σ, %
0,8	0,06	7,2
1	0,04	4,3
1,2	0,05	2,5

Как уже отмечалось, для рассматриваемой САУ важнейшее значение имеют показатели качества переходного процесса при ступенчатом изменении задающего сигнала для выходной координаты – частоты вращения вентилятора. Соответствующая кривая при номинальных

55



значениях параметров объекта приведена на рисунке 3.4.

Рисунок 3.4 – График переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении сигнала задания температуры

Как следует из графика, переходный процесс протекает с недопустимо большими колебаниями частоты вращения вентиляторов, что ведет к динамическим перегрузкам механической части.

Полученный вид переходного процесса можно пояснить, записав выражение для ПФ замкнутой системы, приняв за выходную координату частоту вращения вентиляторов. Преобразованная структурная схема САУ для этого случая приведена на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Преобразованная структурная схема САУ

С учетом преобразованной структурной схемы, искомое выражение для ПФ приведено к виду

$$W_{Z1}(p) = \frac{\Delta f(p)}{\Delta U_3(p)} = \frac{(T_0 p + 1)(T_D p + 1)}{k_0 k_D (2T_E^2 p^2 + 2T_E p + 1)}.$$
 (3.14)

Как следует из полученного выражения, ПФ содержит два форсирующих звена в числителе, что и определяет вид переходного процесса.

Выводы по подразделу

Рассмотренная структура обеспечивает требуемые показатели качества регулирования для основной регулируемой координаты – температуры газа на выходе АВО. Однако показатели качества переходного процесса для частоты вращения вентиляторов оказываются неприемлемыми.

Требуемое качество переходного процесса для выходной координаты – частоты вращения вентиляторов может быть достигнуто различными способами. Рассмотрим возможные способы.

3.3 Одноконтурная САУ АВО газа с ПИД-регулятором в прямой цепи двойным апериодическим фильтром на входе

Для последующего сравнения различных структур САУ обозначим для краткости рассматриваемую систему – вариант 2.

Исследование рассматриваемого варианта САУ выполнено при участии автора в работе [2].

3.3.1 Синтез регулятора

В этом варианте, так же, как в предыдущем, использован ПИДрегулятор. Недопустимое перерегулирование частоты вращения вентиляторов может быть устранено установкой на входе системы двойного апериодического звена с ПФ

$$W_{f2}(p) = \frac{1}{(T_0 p + 1)(T_D p + 1)},$$
(3.15)

компенсирующего негативное влияние форсирующих сомножителей в ПФ замкнутой системы. Рассмотрим далее САУ с таким фильтром на входе. ПФ замкнутой системы относительно частоты вращения вентиляторов в этом случае преобразуется к виду

$$W_Z(p) = \frac{\Delta f(p)}{\Delta U_3(p)} = \frac{1}{k_0 k_D \left(2T_E^2 p^2 + 2T_E p + 1\right)}.$$
 (3.16)

Динамические свойства САУ определяются параметрами полинома знаменателя, которые соответствуют настройке системы на модульный оптимум. Для номинальной системы перерегулирование при такой настройке составляет 4,3%.

3.3.2 Исследование показателей качества регулирования частоты вращения вентиляторов для задающего воздействия

Графики переходных процессов для рассматриваемой выходной координаты – частоты вращения вентиляторов приведены на рисунках 3.6, 3.7, 3.8.

Как следует из рисунков, вариации постоянной времени объекта приводит к увеличению времени переходного процесса за счет медленного «дотягивания» выходной величины до заданного значения.

Показатели качества регулирования при вариациях параметров объекта приведены в таблицах 3.3, 3.4 и показаны на рисунке 3.9.



Рисунок 3.6 – Графики переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении сигнала U₃ задания температуры: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=0,2$.



Рисунок 3.7 – Графики переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении сигнала U₃ задания температуры: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=2$.



Рисунок 3.8 – Графики переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении сигнала U₃ задания температуры: кривая 1 – для $T_0^*=1$; кривая 2 – для $T_0^*=0,8$.

Таблица 3.3 – Показатели качества	и регулирования при вариациях k_0^*
-----------------------------------	---------------------------------------

$k_{ m o}^*$	$t_{\rm p}^{*}$, o.e.	σ, %	σ, ο.e.
0,2	0,28	0	0
0,4	0,12	0	0
0,6	0,08	0	0
0,8	0,05	1,73	0,017
1	0,04	4,3	0,043
2	0,05	16,20	0,162

Таблица 3.4 – Показатели качества регулирования при вариациях T_o

$T_{\rm o}^*$, o.e.	t_p^* , o.e.	σ, %
0,8	1,37	0
1	0,04	0
1,2	1,43	15





Как следует из полученных результатов, рассматриваемый вариант построения САУ обеспечивает требуемые показатели качества регулирования при изменении коэффициента передачи объекта относительно расчетного значения не более чем в два раза, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. Вариации постоянной времени объекта ведут к существенному возрастанию времени переходного процесса за счет медленного «дотягивания» частоты вращения до установившегося значения.

Проанализированы также показатели качества переходного процесса для выходной переменной – температуры газа. Пример графиков переходного процесса приведен на рисунке 3.10. Результаты исследования вариаций показателей качества переходного процесса при отклонении параметров объекта от расчетных значений приведены в таблице 3.5 и отражены на рисунке 3.11. Как показал, анализ вариации постоянной времени объекта от 0,8 $T_{\rm o}^*$ до 1,2 $T_{\rm o}^*$ ведут к изменению показателей качества Изменение коэффициента передачи на доли процента. объекта В рассматриваемом диапазоне также несущественно влияет на показатели качества переходного процесса изменения температуры на выходе АВО.



Рисунок 3.10 – Графики переходных процессов изменения температуры газа на выходе САУ при ступенчатом изменении задающего U₃ сигнала: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=0,2$

Таблица 3.5 – Вариации показателей качества переходного процесса

<i>k</i> _o [*] , o.e.	<i>t</i> _p [*] , o.e.	σ, %
0,2	3,11	0
0,4	3,08	0
1	3,02	0
2	3,01	0



Рисунок 3.11 – График зависимости относительного времени регулирования t_p^* , о.е. от коэффициента передачи объекта k_o^* , о.е. для переходного процесса по температуре газа

62

3.3.3 Исследование показателей качества переходных процессов по возмущающему воздействию

САУ АВО газа подвержена действию различных возмущений. Среди них: изменение температуры газа на входе в АВО, обусловленное изменением режима работы ГПА; суточное изменение температуры и влажности наружного воздуха и др. Указанные возмущения носят «медленный» характер. В качестве наиболее неблагоприятного, «быстрого» возмущения будем рассматривать случай отключения вентиляторов одного из АВО. В этой ситуации температура на выходе УОГ начинает повышаться, и это изменение температуры должно быть парировано работой САУ оставшихся в работе АВО.

Структурная схема системы, учитывающая принятое возмущающее воздействие, приведена на рисунке 3.12. ПФ объекта для возмущающего воздействия принята в виде

$$W_{\rm o}(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta F(p)} = \frac{k_{\rm oF}}{(T_{\rm oF}p+1)},\tag{3.17}$$

где k_{oF} , T_{oF} — коэффициент передачи и постоянная времени объекта по отношению к возмущающему воздействию *F*.



Рисунок 3.12 - Структурная схема САУ с учетом возмущающего воздействия

При моделировании дополнительно оценивались показатели качества при вариациях коэффициента передачи объекта. Результаты моделирования

переходных процессов в САУ по возмущающему воздействию для частоты вращения вентиляторов приведены на рисунках 3.13, 3.14 и отражены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты моделирования переходных процессов в САУ по возмущающему воздействию для частоты вращения вентиляторов

$k_0^*, o.e.$	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2
$t_{\rm p}^{*}$, o.e.	7,01	7,07	4,68	4,64	4,63	4,63
σ, %	0	0	0	0	0	0

Как следует из приведенных данных, переходный процесс протекает без перерегулирования. На начальном интервале частота вращения вентиляторов нарастает наиболее интенсивно. В случае 5-ти кратного уменьшения коэффициента передачи объекта, время регулирования существенно возрастает.



Рисунок 3.13 – Переходный процесс изменения частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении возмущения *F*: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=0,2$



Рисунок 3.14 – Зависимость времени регулирования t_p^* , о.е. частоты вращения вентиляторов от относительного значения коэффициента передачи объекта k_o^* , о.е. для переходного процесса по возмущению

Анализ приведенных результатов исследования показывает, что показатели качества регулирования частоты вращения вентиляторов при действии возмущения находятся в допустимых пределах при вариациях коэффициента передачи объекта управления в 3...4 раза. При большем диапазоне изменения коэффициента передачи объекта существенно увеличивается время регулирования.

Результаты моделирования переходных процессов в САУ по возмущающему воздействию для температуры газа на выходе ABO приведены на рисунках 3.15, 3.16 и отражены в таблице 3.7. Оценивалась относительная величина максимального динамического отклонения температуры Δ_{max} в переходном процессе

$$\Delta_{max} = \frac{\Delta \theta_{max}}{\Delta \theta_{\rm p}},\tag{3.18}$$

где $\Delta \theta_{max}$ – максимальное динамическое отклонение температуры, °*C*; $\Delta \theta_p$ – установившееся отклонение температуры в разомкнутой системе.

65



Рисунок 3.15 – Переходный процесс изменения температуры при скачке возмущения *F*: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=0,2$

Таблица 3.7 – Результаты моделирования переходных процессов в САУ по возмущающему воздействию для температуры газа на выходе ABO

k_{0}^{*} , o.e.	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2
Δ_{max}	0,043	0,025	0,016	0,012	0,010	0,006

Как следует из рисунка 3.15, в замкнутой САУ после окончания переходного процесса отклонение температуры газа на выходе ABO полностью ликвидируется благодаря астатическим свойствам системы. Динамическое отклонение температуры газа при действии возмущения не превышает 5 %. Наибольшая величина $\Delta_{max} = 0,043$ имеет место при минимальном значении коэффициента передачи объекта, и уменьшается с ростом k_0^* .



Рисунок 3.16 – Зависимость максимального динамического отклонения температуры Δ_{max} от относительного значения коэффициента передачи объекта k_o^{*}, о.е.для переходного процесса по возмущению

Выводы по подразделу

Рассмотренный вариант построения системы обеспечивает необходимые показатели качества регулирования как для частоты вращения вентиляторов, так и для основной регулируемой переменной – температуры газа на выходе АВО при вариациях коэффициента передачи объекта управления не более чем 3...4 раза. При большем диапазоне вариаций коэффициента передачи объекта управления необходима перенастройка Существенным регуляторов фильтра. недостатком рассмотренного И варианта является большое количество настраиваемых параметров: 2 постоянные времени фильтра и 3 постоянные времени ПИД регулятора. Известно, что вследствие неточной информации о фактических значениях параметров возникает задача настройки параметров системы. Причем, она усложняется с ростом количества настраиваемых параметров. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть упрощенный вариант системы.

67

3.4 Одноконтурная САУ АВО газа с ПИ-регулятором в прямой цепи и апериодическим фильтром на входе

Вариант 3.

Исследование динамических характеристик рассматриваемой системы, выполненные при участии автора, изложены в [4].

3.4.1 Синтез регулятора

Структурная схема рассматриваемого упрощенного варианта системы аналогична приведенной на рисунке 3.1. В качестве регулятора ограничимся использованием более простого, по сравнению с предыдущим вариантом САУ пропорционально-интегральным регулятором (ПИ-регулятором) с ПФ

$$W_R(p) = \frac{(T_{R1}p+1)}{T_{R2}p}.$$
(3.19)

Учитывая вид ПФ исходной системы в разомкнутом состоянии (3.1)

$$W_P(p) = \frac{k_0 k_E k_D}{(T_E p + 1)(T_0 p + 1)(T_D p + 1)},$$
(3.20)

целесообразно выбрать постоянную времени регулятора $T_{R1} = T_0$ и тем самым скомпенсировать наибольшую постоянную времени. В результате ПФ разомкнутой скорректированной системы принимает вид

$$W_{\rm P}(p) = \frac{k_{\rm o}k_E k_D}{T_{R2}p(T_E p + 1)(T_D p + 1)}.$$
(3.21)

Если пренебречь постоянной времени T_E , которая на порядок меньше постоянной времени T_D , то ПФ (3.21) можно записать в виде

$$W_{\rm P}(p) = \frac{k_{\rm o}k_E k_D}{T_{R2}p(T_D p + 1)} = \frac{1}{T_{\rm M}p(T_D p + 1)},$$
(3.22)

где постоянную времени интегрирующего преобразования

$$T_{\rm M} = \frac{T_{R2}}{k_{\rm o}k_E k_D},\tag{3.23}$$

для настройки САУ на технический оптимум (оптимум по модулю) следует выбрать равной удвоенному значению постоянной времени *T_D*:

$$T_{\rm \scriptscriptstyle H} = 2T_D. \tag{3.24}$$

Фактически при анализе должна также учитываться постоянная времени T_E . В этом случае, чтобы обеспечить необходимый запас устойчивости системы и получить показатели качества близкие к показателям системы, настроенной на оптимум по модулю, как показывает анализ, необходимо принять

$$T_{\mu} = bT_D, \qquad (3.25)$$

где *b* – коэффициент, значение которого больше 2.

Соответственно значение постоянной времени интегрирующего преобразования регулятора в этом случае должно выбираться из соотношения

$$T_{R2} = bk_{01}k_Ek_DT_D = bk_{p1}T_D, (3.26)$$

где k_{o1} – расчетное (эталонное) значение коэффициента передачи ОУ; $k_{p1} = k_{o1}k_Ek_D$ – расчетное значение коэффициента усиления разомкнутой системы.

Передаточная функция замкнутой системы относительно температуры газа на выходе ABO в соответствии со структурной схемой CAУ записана в виде

$$W_{z}^{\theta}(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta U_{3}(p)} = W_{f}(p) \frac{W_{R}(p)W_{E}(p)W_{0}(p)}{1 + W_{R}(p)W_{E}(p)W_{0}(p)W_{D}(p)}.$$
 (3.27)

После преобразований указанная ПФ получена в форме

$$W_{z}^{\theta}(p) = W_{f}(p) \frac{1}{k_{D}} \cdot \frac{(T_{D}p+1)}{k_{p}^{-1}T_{R2}p(T_{E}p+1)(T_{D}p+1)+1},$$
(3.28)

или с учетом соотношения (3.7)

$$W_{z}^{\theta}(p) = W_{f}(p) \cdot \frac{1}{k_{D}} \cdot \frac{(T_{D}p+1)}{bT_{D}^{2}T_{E} \ p^{3} + bT_{D}(T_{E} \ +T_{D})p^{2} + bT_{D}p + 1} \cdot (3.29)$$

Принимая во внимание определяющее значение для рассматриваемой системы показателей качества регулирования для выходной координаты – частоты вращения вентиляторов, запишем выражение для ПФ замкнутой системы относительно этой координаты. После преобразований оно приводится к виду

$$W_{z}^{f}(p) = \frac{\Delta f(p)}{\Delta U_{3}(p)} =$$

= $W_{f}(p) \cdot \frac{1}{k_{0}k_{D}} \cdot \frac{(T_{o}p+1)(T_{D}p+1)}{bT_{D}^{2}T_{E} p^{3} + bT_{D}(T_{E} + T_{D})p^{2} + bT_{D}p + 1}.$ (3.30)

Из соотношения (3.30) следует, что для компенсации наиболее сильной форсировки переходного процесса, порождаемой сомножителем ($T_0p + 1$) в числителе ПФ, упрощенный фильтр следует выполнить в виде апериодического звена с постоянной времени, равной постоянной времени объекта

$$W_f(p) = \frac{1}{T_0 p + 1}.$$
(3.31)

В результате рассматриваемая ПФ примет вид

$$W_z^f(p) = \frac{\Delta f(p)}{\Delta U_3(p)} = \frac{1}{k_0 k_D} \cdot \frac{T_D p + 1}{b T_D^2 T_E p^3 + b T_D (T_E + T_D) p^2 + b T_D p + 1}.$$
 (3.32)

Переходный ΠФ (3.32)процесс В системе с определяется $(T_D p + 1)$ форсирующим звеном И значениями коэффициентов характеристического полинома знаменателя. Последние зависят OT соотношения постоянных времени и значения коэффициента b. Результаты аналитического исследования показывают, что увеличение коэффициента b ведет к снижению колебательности процесса, а при определенном значении коэффициента процесс становится апериодическим. Наиболее ЭТОГО наглядные результаты дает компьютерный эксперимент по оценки влияния этого коэффициента на перерегулирование в системе. Его результата представлены в таблице 3.8 и отражены на рисунках 3.17, 3.18.

Таблица 3.8 – Зависимость показателей качества переходного процесса от коэффициента b

b	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
σ, %	8,80	6,40	4,54	3,08	1,97	1,53	0,61	0,26	0,08	0,01	0,00
$t_{\rm p}^{*}$, o.e.	0,64	0,64	0,35	0,39	0,44	0,47	0,55	0,61	0,67	0,73	0,73



Рисунок 3.17 – График зависимости перерегулирования σ, % от коэффициента b

Полученные результаты показывают, что при рассматриваемых значениях постоянных времени целесообразно принять значение коэффициента b = 2,4, что обеспечивает минимальное время переходного процесса при допустимом перерегулировании, меньшем 5 %.



Рисунок 3.18 – График зависимости относительного времени регулирования t^*_{p} , о.е. от коэффициента *b*

3.4.2 Исследование показателей качества регулирования для задающего воздействия

Проанализируем далее вариации показателей качества переходного процесса для выходной переменной – частоты вращения вентилятора, порождаемые изменением параметров объекта.

Пример графиков переходного процесса при вариациях коэффициента передачи объекта приведен на рисунке 3.19, при вариациях постоянной времени объекта – на рисунках 3.20, 3.21.


Рисунок 3.19 – Графики переходных процессов изменения частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении сигнала U₃ задания температуры:





Рисунок 3.20 – Графики переходных процессов изменения частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении сигнала U₃ задания температуры: кривая 1 – для T₀=1; кривая 2 – для T₀=0,8



Рисунок 3.21 – Графики переходных процессов изменения частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении сигнала U₃ задания температуры: кривая 1 – для $T_0^*=1$; кривая 2 – для $T_0^*=1,2$

Результаты расчета показателей качества переходных процессов сведены в таблицы 3.9, 3.10 и отражены на рисунке 3.22.

T C 2	0 D						
	$\mathbf{u} = \mathbf{p}$	ADVIT TATI I	nacuera	показателен	VALLACTDA	πρηργοπιμιν	THOMPCOOD
таолица Ј.	7 - 1		Dachera	показателен	качества	псислодных	HDOHCCCOP
	-	J · · · ·					

<i>k</i> _o [*] , o.e.	$t_{\rm p}^{*}$, o.e.	σ, %
0,2	3,37	0
0,4	1,44	0
0,6	0,79	0
0,8	0,49	1,17
1	0,35	4,54
2	0,5	27,4



Таблица 3.10 – Результаты расчета показателей качества переходных процессов



Рисунок 3.22 – График зависимости относительного времени регулирования t_p^* , о.е. частоты вращения вентиляторов от коэффициента передачи объекта k_o^* , о.е.

Как следует из приведенных результатов исследования, можно считать, что при вариациях коэффициента передачи объекта управления в 3...4 раза отклонение показателей качества регулирования частоты вращения вентиляторов находятся в допустимых пределах. В то же время система весьма чувствительна к изменению постоянной времени объекта. Для сохранения требуемых показателей качества регулирования вариации постоянной времени объекта не должны превышать ±10...15%.

Проанализированы также показатели качества переходного процесса для выходной переменной – температуры газа. Примеры графиков переходных процессов приведены на рисунках 3.23 – 3.25.



Рисунок 3.23 – Графики переходных процессов изменения температуры газа на выходе ABO при ступенчатом изменении сигнала U₃ задания: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=0,2$



Рисунок 3.24 – Графики переходных процессов изменения температуры газа на выходе ABO при ступенчатом изменении сигнала U₃ задания: кривая 1 – для $T_0^* = 1$; кривая 2 – для $T_0^* = 0.8$.



Рисунок 3.25 – Графики переходных процессов изменения температуры газа на выходе ABO при ступенчатом изменении сигнала U₃ задания: кривая 1 – для $T_0^* = 1$; кривая 2 – для $T_0^* = 1,2$.

Результаты исследования вариаций показателей качества переходного процесса при отклонении параметров объекта от расчетных значений приведены в таблицах 3.11, 3.12 и отражены на рисунке 3.26.

Таблица 3.11 – Показатели качества переходного процесса

при отклонении параметров объекта от расчетных значений

$k_{\rm o}^*$, o.e.	$t_{\rm p}^*$, o.e.	σ,%
0,2	4,99	0
0,4	3,66	0
0,6	3,33	0
0,8	3,20	0
1,0	3,13	0
2,0	3,00	0

Таблица 3.12 – Показатели качества переходного процесса

при отклонении параметров объекта от расчетных значений

$T_{\rm o}^{*}$, o.e.	$t_{\rm p}^{*}$, o.e.	σ, %
0,8	3,23	0
1	3,13	0
1,2	3,02	0



Рисунок 3.26 – График зависимости относительного времени регулирования t_p^* , о.е. от коэффициента передачи объекта k_o^* , о.е. для переходного процесса по температуре

Приведенные результаты показывают, что вариации коэффициента передачи объекта управления в 3...4 раза и постоянной времени на ±15...20% несущественно влияют на показатели качества регулирования температуры газа на выходе АВО.

Исследование показателей качества регулирования по возмущающему воздействию рассмотренного варианта САУ рассмотрено в следующем подразделе.

Дадим краткое сравнении качества управления в САУ по вариантам 2 и 3.

В обоих вариантах для рассматриваемого диапазона вариаций параметров объекта управления обеспечиваются требования по допустимой величине перерегулирования переходных процессов изменения частоты вращения вентиляторов. Переходные процессы по температуре газа на выходе АВО в обоих вариантах протекают без перерегулирования.





В варианте 3 количество настраиваемых параметров на два меньше, чем в варианте 2. Время регулирования в переходном процессе по задающему воздействию для температуры газа в рассматриваемых вариантах (рисунок 3.27) при вариациях коэффициента передачи объекта примерно в 2 раза в сторону снижения и в сторону увеличения отличается несущественно.

Выводы по подразделу

Вариант 3 обеспечивает требуемое качество переходных процессов по температуре газа на выходе ABO и по частоте вращения вентиляторов, с учетом ограничений на перерегулирование, в условиях изменения коэффициента объекта управления в 3...4 раза.

Выводы по разделу

Показано, что существенное значение при оценке качества функционирования САУ АВО газа имеют показатели переходного процесса

при ступенчатом изменении задающего сигнала для выходной координаты – частоты вращения вентиляторов.

Исследован традиционный вариант построения САУ с последовательно включенными регуляторами. Установлено, что в такой структуре без специальных мер не удается выполнить требования к качеству регулирования частоты вращения вентиляторов.

Рассмотрен вариант построения системы с ПИД-регулятором в прямой цепи и фильтром на входе в виде апериодического звена второго порядка. В результате проведенного исследования выявлено, что такой вариант САУ в условиях вариаций коэффициента передачи объекта управления в 3...4 раза обеспечивает необходимые показатели качества регулирования, как для частоты вращения вентиляторов, так и для основной регулируемой переменной – температуры газа на выходе АВО. Его недостатком является большое количество настраиваемых параметров: 2 постоянные времени фильтра и 3 постоянные времени ПИД регулятора.

Известно, что вследствие неточной информации о фактических значениях параметров возникает задача настройки параметров системы. Причем, она усложняется с ростом количества настраиваемых параметров.

В связи с этим рассмотрен упрощенный вариант системы с ПИрегулятором в прямой цепи и апериодическим фильтром на входе. Установлено, что переход к упрощенному варианту построения САУ с учетом рассматриваемого диапазона вариаций параметров объекта управления ведет к несущественным потерям качества управления.

4 СИНТЕЗ НЕТРАДИЦИОННЫХ СТРУКТУР САУ АВО ГАЗА

Как уже отмечалось, в традиционных системах, в том числе рассмотренных в предыдущем разделе, регулятор устанавливается в прямой цепи системы. Между тем, в соответствии с результатами предыдущего анализа, необходимость установки фильтра на входе САУ связана с наличием форсирующего звена в числителе ПФ замкнутой системы для выходной переменной – частоты вращения вентиляторов. Причем это форсирующее звено (форсирующий сомножитель) входит в состав ПИрегулятора и необходимо для компенсации постоянной времени объекта. В связи с этим, возникает идея переноса форсирующего сомножителя в цепь обратной связи системы.

4.1 Одноконтурная САУ АВО газа с И-регулятором в прямой цепи и форсирующим звеном в цепи обратной связи

Вариант 4

Динамические характеристики рассматриваемой системы, выполненные при участии автора, рассмотрены в [5].

4.1.1 Синтез регуляторов

Структурная схема рассматриваемого варианта системы приведена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Структурная схема системы с ПД-регулятором в цепи обратной связи

В соответствии со структурной схемой, исходный ПИ-регулятор разбивается на И-регулятор и пропорционально-дифференциальный ПД-регулятор, называемый также форсирующим звеном.

Таким образом, в рассматриваемой САУ (рисунок 23) в цепи обратной связи включен ПД-регулятор с ПФ

$$W_{R1}(p) = (T_{R1}p + 1), (4.1)$$

а в прямой цепи установлен интегральный И-регулятор с ПФ

$$W_{R2}(p) = 1/T_{R2}p.$$
 (4.2)

Очевидно, что ПФ этих двух регуляторов совпадает с ПФ, используемого в варианте 3 САУ ПИ-регулятора

$$W_R(p) = \frac{(T_{R1}p + 1)}{T_{R2}p}.$$
(4.3)

Соответственно, динамические свойства исходной САУ в разомкнутом состоянии описываются той же ПФ, что и в варианте 3:

$$W_{\rm P}(p) = \frac{k_{\rm o}k_E k_D}{(T_E p + 1)(T_{\rm o}p + 1)(T_D p + 1)},$$
(4.4)

И здесь так же целесообразно выбрать постоянную времени регулятора

$$T_{R1} = T_0 \tag{4.5}$$

и тем самым скомпенсировать наибольшую постоянную времени объекта управления.

Аналогично варианту 3, после введения регуляторов ПФ разомкнутой скорректированной системы принимает вид

$$W_{\rm P}(p) = \frac{k_{\rm o}k_E k_D}{T_{R2}p(T_E p + 1)(T_D p + 1)}.$$
(4.6)

Постоянная времени интегрирующего звена принята, как и в предыдущем варианте,

$$T_{R2} = bk_{o1}k_Ek_D T_D = bk_{p1}T_D, (4.7)$$

где b = 2,4 -настроечный коэффициент;

 k_{o1} – расчетное (эталонное) значение коэффициента передачи ОУ;

 $k_{p1} = k_{o1}k_Ek_D$ – расчетное значение коэффициента усиления разомкнутой системы.

Несмотря на аналогию ПФ систем в разомкнутом состоянии, передаточные функции системы в замкнутом состоянии приобретают иной, чем в варианте 3, вид и, соответственно, САУ приобретает новые свойства.

Передаточная функция замкнутой системы относительно температуры газа на выходе ABO в соответствии со структурной схемой САУ (рисунок 4.1) записана в виде

$$W_{z}^{\theta}(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta U_{3}(p)} = \frac{W_{R2}(p)W_{E}(p)W_{0}(p)}{1 + W_{R2}(p)W_{E}(p)W_{0}(p)W_{D}(p)W_{R1}(p)}.$$
 (4.8)

После преобразований ПФ (4.8) совпадает с соответствующими ПФ, полученными в предыдущем подразделе для системы с фильтром

$$W_{z}^{\theta}(p) = \frac{1}{k_{D}} \cdot \frac{(T_{D}p+1)}{(T_{R1}p+1) \left[k_{p}^{-1}T_{R2}p(T_{D}p+1)(T_{E}p+1)+1\right]}, \quad (4.9)$$

или с учетом соотношения (4.7)

$$W_{z}^{\theta}(p) = \frac{1}{k_{D}} \cdot \frac{(T_{D}p+1)}{(T_{R1}p+1) \left[bT_{D}^{2}T_{E} \ p^{3} + bT_{D} \left(T_{E} \ + T_{D}\right) p^{2} + bT_{D}p + 1 \right]} . (4.10)$$

Выбор значения коэффициента *b* и постоянной времени интегрирующего преобразования регулятора проводится так же, как в

предыдущем варианте САУ.

Преобразованная структурная схема системы для выходной переменной – частоты вращения вентиляторов показана на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Преобразованная структурная схема САУ с ПД-регулятором в цепи обратной связи

В соответствии с ней выражение для ПФ замкнутой системы относительно частоты вращения вентиляторов будет:

$$W_z^f(p) = \frac{\Delta f(p)}{\Delta U_3(p)} = \frac{W_{R2}(p)W_E(p)}{1 + W_{R2}(p)W_E(p)W_0(p)W_D(p)W_{R1}(p)}.$$
 (4.11)

После преобразований оно приводится к виду

$$W_z^f(p) = \frac{\Delta f(p)}{\Delta U_3(p)} = \frac{1}{k_0 k_D} \cdot \frac{(T_D p + 1)}{b T_D^2 T_E \ p^3 \ + b T_D (T_E \ + T_D) p^2 \ + b T_D p + 1}.$$
(4.12)

Из последнего соотношения следует, что, в отличие от варианта 3, здесь ПФ замкнутой системы содержит в числителе форсирующее звено с относительно «малой» постоянной, и для компенсации его влияния нет необходимости использовать фильтр на входе системы.

Исследование влияния вариаций параметров элементов САУ на показатели качества регулирования дает те же результаты, что и для системы по варианту 3.

4.1.2 Исследование показателей качества переходных процессов по возмущающему воздействию

Как показано в предыдущем подразделе, динамические свойства систем по варианту 3 и варианту 4 оказываются аналогичными.

В связи с этим, проведенное ниже исследование качества переходных процессов по возмущающему воздействию относятся и к варианту 3. Общие соображения по методике исследования изложены в разделе 3.2.

Структурная схема системы, учитывающая принятое возмущающее воздействие, приведена на рисунке 4.3. ПФ объекта для возмущающего воздействия записана, как и выше, в виде

$$W_{\rm o}(p) = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta F(p)} = \frac{k_{\rm oF}}{(T_{\rm oF}p+1)^2}$$

где k_{oF} , T_{oF} - коэффициент передачи и постоянная времени объекта по отношению к возмущающему воздействию *F*.



Рисунок 4.3 – Структурная схема САУ с учетом возмущающего воздействия

При моделировании оценивались показатели качества при вариациях коэффициента передачи объекта. Результаты моделирования переходных процессов в САУ по возмущающему воздействию для частоты вращения вентиляторов приведены на рисунке 4.4 и отражены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты моделирования переходных процессов в САУ по возмущающему воздействию для частоты вращения вентиляторов

k_{0}^{*} , o.e.	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2
$t_{\rm p}^{*}$, o.e.	5,14	2,13	4,07	4,22	4,3	4,49
σ, %	12	0	0	0	0	0

Как следует из приведенных данных, перерегулирование превышает 5 % лишь в случае 5-ти кратного уменьшения коэффициента передачи объекта, в остальных ситуациях оно остается на допустимом уровне.



Рисунок 4.4 – Переходный процесс изменения частоты вращения вентиляторов при скачке возмущения *F*: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=0,4$

Результаты моделирования переходных процессов в САУ ПО возмущающему воздействию для температуры газа на выходе АВО на рисунке 4.6 и отражены в таблице 4.2. Оценивалась приведены относительная величина максимального динамического отклонения температуры Δ_{max} в переходном процессе

$$\Delta_{max} = \frac{\Delta \theta_{max}}{\Delta \theta_{\rm p}},\tag{4.13}$$

где $\Delta \theta_{max}$ – максимальное динамическое отклонение температуры, °*C*; $\Delta \theta_{\rm p}$ – установившееся отклонение температуры в разомкнутой системе.



Рисунок 4.5 – Зависимость времени регулирования t_p^* , о.е. частоты вращения вентиляторов от относительного значения коэффициента передачи объекта k_0^* , о.е. для переходного процесса по возмущению



Рисунок 4.6 – Переходный процесс изменения температуры при скачке возмущения *F*: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=0,4$

Таблица 4.2 – Результаты моделирования переходных процессов в САУ по возмущающему воздействию для температуры газа на выходе ABO

k_0^* , o.e.	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2
Δ_{max}	0,24	0,17	0,13	0,11	0,10	0,07



Рисунок 4.7 – Зависимость максимального динамического отклонения температуры Δ_{max} от относительного значения коэффициента передачи объекта k_0^* , о.е. для переходного процесса по возмущению

Как следует из рисунка 4.6, в замкнутой САУ, благодаря ее астатическим свойствам после окончания переходного процесса отклонение температуры газа на выходе ABO полностью ликвидируется. При изменении коэффициента передачи объекта в 4 раза наибольшая величина динамического отклонения температуры газа на выходе ABO Δ_{max} =0,15 имеет место при минимальном значении коэффициента передачи объекта, и уменьшается с ростом k_0^* .

Выводы по подразделу

Таким образом, передаточные функции системы по задающему воздействию и возмущению для вариантов 3 и 4 оказываются аналогичными. В варианте 3 требуемые динамические характеристики достигаются с помощью дополнительного фильтра на входе САУ. Следовательно, в рассматриваемом варианте 4 САУ за счет переноса форсирующего звена регулятора в цепь обратной связи и использования в прямой цепи И-регулятора можно отказаться от использования фильтра на входе. При

этом показатели качества регулирования в предлагаемом варианте будут совпадать С соответствующими показателями ДЛЯ варианта 3. Перерегулирование частоты вращения вентиляторов в случае ступенчатого изменения задания температуры не превышает 5 % в условиях изменения коэффициента передачи объекта управления в 3...4 раза. Максимальное относительное динамическое отклонение температуры газа на выходе АВО в условиях действия наиболее неблагоприятного возмущения И рассматриваемого диапазона вариаций параметров объекта управления не превышает 15 %.

4.2 Двухконтурная САУ АВО газа с И-регулятором в прямой цепи и форсирующим звеном в цепи обратной связи (вариант 5)

В [36] предложена структура САУ с дополнительным контуром обратной связи по регулируемой переменной, позволяющая достичь высокого качества управления в условиях нестационарности объекта управления. Рассмотрим возможности использования и особенности синтеза регуляторов в такой структуре применительно к САУ температурой газа на выходе АВО.

4.2.1 Синтез регуляторов

Структурная схема, рассматриваемого варианта системы, приведена на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 – Структурная схема двухконтурной САУ

Здесь сигнал датчика температуры через ПД-регулятор, в отличие от предыдущего варианта, дополнительно подается на вход регулятора с ПФ $W_{R3}(p)$, в результате чего в системе образуется дополнительный контур обратной связи.

Внутренний контур системы, образованный звеньями с ПФ $W_{R2}(p)$, $W_E(p)$, $W_0(p)$, $W_D(p)$, $W_{R1}(p)$, аналогичен предыдущему варианту системы. Соответственно, передаточная функция внутреннего замкнутого контура системы относительно температуры газа на выходе ABO совпадает с ПФ (4.8), (4.10)

$$W_{z1}^{\theta}(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta U_3(p)} = \frac{W_{R2}(p)W_E(p)W_0(p)}{1 + W_{R1}(p)W_E(p)W_0(p)W_D(p)W_{R2}(p)}.$$
 (4.14)

ПФ внутреннего замкнутого контура относительно частоты вращения вентиляторов аналогична выражению (4.12)

$$W_{z1}^{f}(p) = \frac{\Delta f(p)}{\Delta U_{3}(p)} = \frac{1}{k_{0}k_{D}} \cdot \frac{(T_{D}p+1)}{bT_{D}^{2}T_{E} \ p^{3} + bT_{D}(T_{E} \ +T_{D})p^{2} + bT_{D}p + 1}.$$
 (4.15)

Во внешнем контуре с целью придания САУ астатических свойств используется интегральный регулятор с ПФ

$$W_{R3}(p) = \frac{1}{T_{R3}p}.$$
(4.16)

На основе структурной схемы (рисунок 4.8) записано выражение для ПФ замкнутой двухконтурной системы относительно температуры газа на выходе АВО

$$W_{z2}^{\theta}(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta U_{3}(p)} = \frac{W_{R3}(p)W_{z1}^{\theta}(p)}{1 + W_{R3}(p)W_{R1}(p)W_{D}(p)W_{z1}^{\theta}(p)}.$$
(4.17)

После преобразований знаменатель ПФ приведен к виду полинома пятого порядка

$$W_{z2}^{\theta}(p) = \frac{1}{k_D} \cdot \frac{1}{(T_{R1}p + 1)(a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p + a_4)}, \quad (4.18)$$

где:

$$a_0 = bT_{R3}T_D^2T_E$$
; $a_1 = bT_{R3}T_D(T_D + T_E)$; (4.19)

$$a_2 = bT_{R3}T_D; a_3 = T_{R3}; a_4 = 1.$$
 (4.20)



Рисунок 4.9 – Преобразованная структурная схема для выходной переменной – частоты вращения вентиляторов

С учетом преобразованной структурной схемы – рисунок 4.9 найдено выражение для ПФ замкнутой двухконтурной системы относительно частоты вращения вентиляторов

$$W_{z2}^{f}(p) = \frac{\Delta f(p)}{\Delta U_{3}(p)} = \frac{W_{R3}(p)W_{z1}^{f}(p)}{1 + W_{R3}(p)W_{0}(p)W_{D}(p)W_{z1}^{f}(p)}.$$
 (4.21)

После преобразований оно приведено к виду

$$W_{z2}^{f}(p) = \frac{1}{k_{o}k_{D}} \cdot \frac{T_{D}p + 1}{a_{0}p^{4} + a_{1}p^{3} + a_{2}p^{2} + a_{3}p + a_{4}}.$$
 (4.22)

Расчетные соотношения для коэффициентов полинома знаменателя (4.22) совпадают с полученными выше (4.19), (4.20).

С учетом приведенных выражений для коэффициентов полинома

знаменателя можно заметить, что значения коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 с увеличением коэффициента передачи объекта уменьшаются. Следовательно, снижается их влияние на динамические характеристики САУ. В пределе, при достаточно больших значениях k_0 полином знаменателя вырождается в полином первого порядка с коэффициентом $a_3 = T_{R_3}$.

Дальнейшее аналитическое исследование полученных выражений не дает достаточно наглядных результатов. Поэтому настройку системы целесообразно выполнять с использованием моделирования. В такой системе, как показывают результаты моделирования, целесообразно постоянную T_{R2} регулятора внутреннего контура выбирать меньше, чем варианте 4. В этом случае колебательность переходного процесса во внутреннем контуре (при отключении внешнего) увеличивается, однако, замыкание внешнего контура снижает колебательность. Чтобы обеспечить необходимый запас устойчивости внутреннего контура при вариациях коэффициента передачи объекта, значение T_{R2} можно уменьшать примерно в 2 раза, по сравнению с вариантом 4. В частности, для рассматриваемых параметров звеньев системы выбрано значение

$$T_{R2} = bk_{o1}k_Ek_D T_D = bk_{p1}T_D, (4.23)$$

где b = 1,2- настроечный коэффициент (отметим, что в варианте 4 значение b = 2,4);

 k_{p_1} – коэффициент передачи номинальной системы.

Для внешнего контура при моделировании системы, результаты которого приведены в таблице 4.3 и отражены на рисунке 4.10, постоянная времени T_{R3} выбрана так, чтобы обеспечить перерегулирование не более 5 % для переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении задания по температуре. Причем при поиске наилучшего значения T_{R3} коэффициент передачи объекта задавался

минимальным $k_{\rm o}^* = k_{\rm omin}^* = 0,2.$

T_{R3}^*	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$t_{\rm p}^{*}$, o.e.	3,35	3,53	3,64	3,65	2,25	2,47	2,71	1,34
σ, %	13,6	10,58	8,12	6,11	4,48	3,17	2,14	1,34

Таблица 4.3 – Зависимость показателей качества переходного процесса по частоте вращения вентиляторов от относительного значения постоянной T_{R3}^*



Рисунок 4.10 – Зависимость перерегулирования σ , % от относительного значения постоянной времени регулятора T_{R3}^{*} , о.е.

Для принятых параметров элементов системы относительное значение постоянной интегрирования внешнего контура составило $T_{R3}^* = 1,2$.

4.2.2 Исследование показателей качества регулирования по задающему воздействию

Результаты анализа влияния вариаций коэффициента передачи объекта на показатели качества регулирования переходного процесса для частоты вращения вентиляторов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Влияние коэффициента передачи объекта на показатели качества регулирования переходного процесса для частоты вращения вентиляторов

$k_{\rm o}^*$, o.e.	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2
$t_{\rm p}^{*}$, o.e.	2,25	2,76	3,05	3,17	3,24	3,37
σ, %	4,5	0	0	0	0	0

Как САУ следует приведенных данных, В двухконтурной ИЗ перерегулирование по частоте вращения вентиляторов не превышает 5 % во вариаций коэффициента всем диапазоне передачи объекта. Время k_{0}^{*} регулирования увеличением увеличивается С незначительно (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Зависимость времени регулирования частоты вращения вентиляторов от коэффициента передачи объекта

Кроме того, проведено исследование показателей качества переходного процесса при изменении сигнала задания для температуры газа на выходе ABO. Показатели качества регулирования температуры газа приведены на рисунке 4.12 и в таблице 4.5.

Из приведенных данных следует, что при 10-и кратном изменении коэффициента передачи объекта управления переходные процессы протекают без перерегулирования, а время регулирования несущественно зависит от коэффициента передачи объекта.



Таблица 4.5 – Показатели качества регулирования температуры газа

Рисунок 4.12 – Зависимость времени регулирования температуры от коэффициента передачи объекта

4.2.3 Исследование показателей качества переходных процессов по возмущающему воздействию

Исследование проводилось по той же методике, что и в предыдущем подразделе.

Переходный процесс для частоты вращения вентиляторов при скачке возмущения приведен на рисунке 4.13.

Результаты исследований влияния вариаций коэффициента передачи объекта на показатели качества рассматриваемого переходного процесса приведены в таблице 4.6 и отражены на рисунке 4.14.

Таблица 4.6 – Влияние коэффициента передачи объекта на показатели качества переходного процесса

$k_{\rm o}^*$, o.e.	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2
$t_{\rm p}^{*}$, o.e.	2,13	4,22	4,34	4,01	4,49	4,57
σ, %	0	0	0	0	0	0



Рисунок 4.13 – Переходный процесс изменения частоты вращения вентиляторов при скачке возмущения F: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=0,4$.



Рисунок 4.14 – График зависимости времени регулирования частоты вращения вентиляторов от коэффициента передачи объекта при скачке возмущающего воздействия

Как следует из полученных данных, переходные процессы при скачке возмущающего воздействия в условиях изменения коэффициента передачи объекта в 10 раз протекают без перерегулирования, меняется лишь время

регулирования.

Исследованы показатели качества регулирования температуры на выходе ABO при скачке возмущающего воздействия, результаты которых представлены на рисунках 4.15, 4.16 и в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Показатели качества регулирования температуры на выходе ABO при скачке возмущающего воздействия

k_{0}^{*} , o.e.	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2
Δ_{max} , o.e.	0,17	0,11	0,09	0,08	0,07	0,05



Рисунок 4.15 – Переходный процесс изменения температуры при скачке возмущения *F*: кривая 1 – для $k_0^*=1$; кривая 2 – для $k_0^*=0,4$

На рисунке 4.16 для сравнения приведена кривая 2 зависимости максимального динамического отклонения температуры для САУ по варианту 4. Сравнение показывает меньшее значение величины динамического отклонения температуры в двухконтурной системе.



Рисунок 4.16 – График зависимости максимального динамического отклонения температуры Δ_{max}, о.е. от коэффициента передачи объекта k_0^* , о.е. при скачке возмущающего воздействия: кривая 1 – для варианта 5; кривая 2 – для варианта 4

Выводы по подразделу

Двухконтурная САУ обеспечивает в условиях вариаций коэффициента передачи объекта управления в 10 раз поддержание температуры на выходе ABO газа с динамическим отклонением не более 17%, а в установившемся режиме, благодаря астатизму системы достигается нулевая статическая ошибка. Переходные процессы изменения частоты вращения вентиляторов в тех же условиях при ступенчатом изменении задающего и возмущающего воздействия протекают с допустимым перерегулированием.

4.3. Сравнительный анализ вариантов САУ АВО газа

Задача выбора наилучшего варианта САУ должна рассматриваться как задача многокритериальной оптимизации [71, 74, 82, 83, 85, 88, 92, 97]. В

общем случае при анализе должны учитываться:

 показатели качества регулирования по задающему воздействию (время регулирования и перерегулирование) для частоты вращения вентиляторов;

 показатели качества регулирования по задающему воздействию (время регулирования и перерегулирование) для температуры газа на выходе ABO;

 показатели качества регулирования по возмущающему воздействию (время регулирования и перерегулирование) для частоты вращения вентиляторов;

 показатель качества регулирования по возмущающему воздействию (максимальная величина динамического отклонения температуры) для температуры газа на выходе ABO;

- количество настраиваемых параметров САУ.

Кроме того, оценке подлежат робастные свойства вариантов САУ – способность обеспечивать требуемое качество регулирования в условиях изменения:

- коэффициента передачи и постоянных времени объекта управления;

- постоянной времени датчика температуры;

- постоянной времени электропривода.

В связи с тем, что в многокритериальных задачах критерии могут носить противоречивый характер, оптимизация по разным критериям приводит к разным результатам. Чтобы разрешить это противоречие, используют или различные методы, позволяющие свести задачу к однокритериальной, или используют иное понятие оптимальности.

Многокритериальную задачу можно свести к однокритериальной за счет ранжирования критериев или свертки критериев. В случае ранжирования критериев их рассматривают, например, с использованием экспертных оценок, в порядке убывания их важности (значимости) для лица, принимающего решение, и получают некоторую последовательность критериев $J_1, J_2, ..., J_n$. Решается задача оптимизации по главному критерию, и находится его оптимальное значение J_{10nr} . Далее назначается возможная уступка (потеря качества) по главному критерию, которую можно допустить для главного критерия при оптимизации по J_2 . И решается задача оптимизации по второму критерию с учетом ограничения на потерю J_1 . Аналогичные процедуры используют для других критериев. В результате по этому методу решается последовательность однокритериальных задач оптимизации в условиях дополнительных ограничений на потерю качества по главному критерию.

Второй метод сведения многокритериальной задачи к однокритериальной (свертка критериев) заключается в формировании нового критерия, например в виде взвешенной суммы критериев:

$$J = \alpha_1 J_1 + \alpha_2 J_2 + \dots + \alpha_n J_n.$$

Здесь весовые коэффициенты α₁ характеризуют важность (значимость) отдельных критериев. Выявление их значений проводится обычно с использованием различных методов экспертных оценок.

В случаях, когда затруднительно использовать изложенные подходы, меняют сам подход к оптимизации и понятие оптимальности. Один из таких приемов заключается в использование понятия оптимальности по Парето [78, 83, 88, 91, 92].

Вместо оптимальных решений, в смысле достижения экстремума одного критерия, ищут Парето-оптимальные (эффективные) решения. Под ними понимают решения, которые нельзя улучшить сразу по всем критериям. Формирование множества Парето-оптимальных решений проводят путем парного (бинарного) сравнения вариантов решений [74, 78, 83, 85, 97]. Так например в задаче минимизации, *i*-й вариант решения является предпочтительным по сравнению с *j*-м, если выполняются условия

$$J_{1i} \le J_{1j}, \ J_{2i} \le J_{2j} \dots \ J_{ni} \le J_{nj}, \tag{4.24}$$

причем, хотя бы для одного критерия имеет место строгое неравенство.

Для двух критериев оптимальности методика выбора Паретооптимальных решений может быть проиллюстрирована на координатной плоскости с осями J₁, J₂.

Геометрически в плоскости критериев допустимые решения могут быть показаны точками (рисунок 4.17).



Рисунок 4.17 – Пояснение к построению множества Парето

При использовании графической интерпретации для определения точек, входящих в множество Парето, используется следующая процедура. Строится вспомогательная система координат с центром в исследуемой точке (например, точка B_2 на рисунке 4.17). Исследуемая точка входит в множество Парето только в том случае, если в третьем квадранте вспомогательной системы координат нет других точек. В рассматриваем примере допустимое решение в точке B_2 является Парето-оптимальным. Использование этой процедуры и для других точек позволяет найти множество Парето. В частности, для рассматриваемого примера в него входят только решения, соответствующие точкам B_1 , B_2 , B_3 . Причем только точки B_1 и B_2 соответствуют оптимальным решениям по критериям J_1 и J_2 , соответственно.

Для получения обозримых результатов в диссертационной работе

использованы различные приемы решения задачи многокритериальной оптимизации.

Прежде всего, уменьшим количество рассматриваемых показателей качества.

При синтезе различных вариантов САУ накладывались ограничения на величину перерегулирования для частоты вращения вентиляторов в переходных процессах по управляющему и возмущающему воздействиям в условиях вариаций коэффициента передачи объекта. Для всех вариантов САУ величина перерегулирования не превышает 5 %. Время регулирования частоты вращения вентиляторов не является определяющим для САУ стабилизации температуры. В связи с изложенным показатели качества переходных процессов регулирования частоты вращения вентиляторов можно рассматривать в качестве выполненных ограничений.

Максимальная величина динамического отклонения температуры для переходных процессов по возмущению для всех вариантов САУ также находится в допустимых пределах. Следовательно, этот показатель качества может быть перенесен в число выполненных ограничений.

В результате, в качестве первого главного показателя качества (критерия оптимизации J_1) можно рассматривать время переходного процесса изменения температуры по задающему воздействию. При этом учитывается, что перерегулирование в этом переходном процессе для всех вариантов САУ оказывается в допустимых пределах.

Вторым главным показателем качества примем количество настраиваемых параметров САУ, обозначим его *J*₂.

Поскольку задача выбора наилучшего варианта, даже после ее упрощения, содержит два показателя качества (критерия оптимизации) воспользуемся для ее решения методикой отыскания Парето-оптимальных решений.

В таблице 4.8 приведены обобщенные данные о времени переходного процесса изменения температуры по задающему воздействию для различных

вариантов построения системы. Причем для вариантов 2...4 показатели качества оценивались для диапазона D_K вариаций параметров объекта управления в 4 раза, а для варианта 5 – в 10 раз. Отметим, что допустимый диапазон вариаций коэффициента передачи объекта управления выбирался по условию: перерегулирование переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов не должно превышать 10%.

Таблица 4.8 – Данные о времени переходного процесса изменения температуры по задающему воздействию

№ варианта	J_2 - количество			
САУ	настраиваемых	D_K	t^*_{pmin} , o. e.	$t_{\mathrm pmax}^*$, o. e.
	параметров САУ			
2	5	4	3,0	3,1
3	3	4	3,1	4,9
4	2	4	3,1	4,9
5	3	10	3,3	5,0

По данным таблицы 4.8 на рисунке 4.18 в координатах критериев оптимизации построена диаграмма, обычно применяемая для пояснений в методе Парето. В отличие от традиционных диаграмм Парето, здесь каждому варианту соответствует не точка, а некоторый интервал возможных значений критерия $J_1 = \{t_{pmin}^*, t_{pmax}^*\}$.



Рисунок 4.18 - К определению Парето-оптимальных решений

Анализируя диаграмму можно отметить следующее.

Вариант 2 по критерию J_1 имеет преимущество над остальными, только если учитывать диапазон изменения t_p^* . По критерию J_2 он уступает остальным.

Вариант 4 по критерию J_2 примерно равноценен вариантам 3, 5, но превосходит их по критерию J_1 .

Таким образам, без учета требований робастности системы Паретооптимальным вариантом можно считать вариант 4.

Перейдем к учету требований робастности САУ. Как показал предварительный анализ, все варианты САУ мало чувствительны к вариациям постоянных времени датчика температуры и электропривода: вариации указанных постоянных на $\pm 20\%$ приводят к изменениям J_2 на 1...3 %. Оценим чувствительность САУ по вариантам 4 и 5 к изменению класса объекта. Как отмечалось выше, для описания объекта может использоваться ПФ апериодического звена первого порядка (именно для такой модели выполнялся синтез регуляторов)

$$W_{\rm o}(p) = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta f(p)} = -\frac{k_{\rm o}}{(T_{\rm o}p + 1)},$$
 (4.25)

или ПФ апериодического звена второго порядка

$$W_{\rm o}(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta f(p)} = -\frac{k_{\rm o}}{(T_{\rm o}p+1)(T_{\rm o1}p+1)}.$$
(4.26)

Такие вариации математической модели обычно называют изменением класса объекта.

Для исследования чувствительности к изменению класса объекта проводилась оценка изменений показателей качества при вариациях *T*₀₁. Результаты исследования для переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов по задающему воздействию приведены в таблице 4.9

и отражены на рисунке 4.19.

Вариант САУ	T_{01}^{*} , o.e.	0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04
3и4	σ. %	4,54	5,32	6,2	7,14	9,28	10,16	11,69	12,96	15,59
5		0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 4.10



Рисунок 4.19 – Графики зависимости перерегулирования σ, % от значения постоянной времени *T*_{o1}^{*}, о.е.: кривая 1 – вариант САУ 3 и 4; кривая 2 – вариант САУ 5

Приведенные данные показывают, что в вариантах 3 и 4 САУ при возрастании T_{o1} перерегулирование превышает допустимое значение, а в варианте 5 остается постоянным, равным нулю. Результаты дополнительных исследований показывают, что время рассматриваемого переходного процесса в вариантах 3 и 4 изменяется более чем в два раза. В варианте 5 даже для значения $T_{o1}^{*} = 0,1$ время изменяется менее, чем на 1 %.

В сопоставляемых вариантах время переходных процессов для температуры газа изменяется на 1...2 %.

Таким образом, сравнивая варианты 4 и 5 с учетом требований робастности, следует отдать предпочтение варианту 5. Вариант 4 может быть рекомендован в тех случаях, когда КС работает в стабильном режиме по производительности и диапазон вариаций коэффициента передачи объекта управления не превышает 3...4.

Выводы по подразделу

Сформулирована задача выбора наилучшего варианта построения САУ ABO газа И показано, решаться ЧТО она может как задача многокритериальной оптимизации. Рассмотрены возможные критерии оптимизации, проведен сравнительный анализ различных вариантов систем, даны рекомендации по предпочтительным структурам САУ.

Выводы по разделу

Результаты исследования САУ АВО газа с ПД-регулятором в цепи обратной связи и И-регулятором в прямой цепи с учетом вариаций коэффициента передачи объекта управления в 3...4 раза свидетельствуют о возможности уменьшения количества настраиваемых параметров при сохранении показателей качества регулирования, присущих системам традиционной структуры.

Предложена структура двухконтурной САУ АВО газа. Показано, что ее использование дополнительно позволяет обеспечить робастность САУ в условиях вариаций параметров датчика обратной связи и изменения параметров и класса объекта управления.

Исследование динамических процессов при действии наиболее неблагоприятного возмущающего воздействия показало, что предложенные варианты построения системы обеспечивают поддержание температуры на выходе ABO газа с допустимым динамическим отклонением, а в установившемся режиме, благодаря использованию интегральных регуляторов достигается нулевая статическая ошибка. Переходные процессы изменения частоты вращения по задающему и возмущающему воздействиям протекают с допустимым перерегулированием.

На основе методов решения задач многокритериальной оптимизации

проведен сравнительный анализ исследованных систем и указаны предпочтительные структуры САУ АВО газа с учетом возможного диапазона вариаций параметров звеньев системы.

5 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ САУ АВО ГАЗА

5.1 Реализация САУ АВО газа

Система автоматического управления температурой газа на выходе ABO смонтирована в КТП 10/0,4 кВ компрессорной станции ООО «Газпром трансгаз Югорск». Система управляет штатной установкой охлаждения газа (УОГ) с двенадцатью аппаратами типа 2АВГ-75. Каждый аппарат воздушного охлаждения оснащен двумя вентиляторами (всего 24 вентилятора), приводимыми в движение электродвигателями типа ВАСО мощностью 37 кВт.

Система управления представляет собой замкнутую систему управления температурой газа в выходном коллекторе ABO. Управление температурой осуществляется путем изменения частоты вращения вентиляторов ABO с помощью преобразователей частоты (ПЧ).

В состав системы входят:

- 12 шкафов, в которых размещены 24 ПЧ (по одному ПЧ на каждый электродвигатель) и пускорегулирующая аппаратура;

- шкаф автоматики, в котором размещен контроллер, обеспечивающий автоматический режим работы, а также релейная схема, обеспечивающая дискретный режим работы двигателей вентиляторов;

- система вентиляции КТП АВО, которая включает в себя шкаф вентиляции, воздушные клапана с электроприводом, вентиляторы с частотно-регулируемым приводом и датчик температуры воздуха в КТП;

- датчики температуры газа, установленные во входном и выходном коллекторах ABO, а также на выходе каждой секции ABO газа;

- автоматизированное рабочее место (APM), установленное в главном щите управления (ГЩУ) КЦ 9, 10.

Функциональная схема системы представлена на рисунке 5.1.


Рисунок 5.1 – Функциональная схема САУ

АРМ оператора спроектировано в SCADA-пакете MasterSCADA. Обмен данными между контроллером и ПК реализован по протоколу Modbus-RTU. Передача данных из контроллера производится через физический интерфейс RS-485. Преобразование сигнала RS-232 в RS-485 осуществляется с помощью конвертера ICP-CON I-7520. При выключении APM система полностью сохраняет работоспособность в автоматическом режиме.

Контроллер ABBAC500 размещен в шкафу автоматики (ША) в КТП ABO и состоит из модулей, установленных на единой шине и управляемых центральным процессором. В программном обеспечении центрального процессора контроллера реализован алгоритм автоматического регулирования температуры газа на основе ПИ – регулятора. Выходной сигнал ПИ-регулятора определяет величину задания частоты ПЧ. Значение текущей частоты вращения электродвигателя поступает в контроллер по каналам связи с каждого ПЧ.

Обратной связью для ПИ-регулятора по умолчанию является температура газа в выходном коллекторе установки охлаждения газа, но в программе контроллера реализована так же возможность выбора в качестве датчика обратной связи датчика температуры газа на выходе отдельного ABO. Температура газа измеряется с помощью датчиков температуры ТСПУ Метран-276-06-Exia-400-0,5-H10-(-50+100)C4-20мА-T5-У1.1-ГП (термопреобразователь с унифицированным выходным сигналом). Величина измеренной температуры передается в виде унифицированного токового сигнала 4...20 мА в модуль аналогового ввода AI523.

Дискретные сигналы собираются в трех модулях дискретного ввода/вывода DC532.

Обмен данными между контроллером и ПЧ реализован с помощью двух коммуникационных процессоров CM-574RS по четырем отдельным каналам связи (по шесть ПЧ на один канал), что дополнительно повышает

110

стабильность работы системы.

В системе реализовано пять режимов работы, три из которых являются основными и два вспомогательными. К основным относятся автоматический, полуавтоматический и ручной режимы. Управление в основных режимах производится с АРМ АВО газа.

К вспомогательным режимам относятся дискретный режим управления с САУ КЦ и режим местного управления с двери шкафа управления. Вспомогательные режимы предназначены для выполнения пусконаладочных и ремонтных работ.

В автоматическом режиме с помощью алгоритма ПИ-регулирования поддерживается температура газа на выходе установки охлаждения газа, заданная на АРМ оператора. При этом все вентиляторы работают на одинаковой частоте. В автоматическом режиме оператор может выбрать датчик обратной связи (по умолчанию выбран датчик, установленный в выходном коллекторе ABO газа).

В полуавтоматическом режиме оператор может самостоятельно выбрать способ включения каждого вентилятора в отдельности: через алгоритм ПИ-регулирования, либо плавный пуск до максимальной частоты.

При ручном режиме оператор регулирует температуру газа путем изменения количества работающих вентиляторов. При этом двигатели вентиляторов пускаются плавно, с заданным временем разгона, и их пусковые токи не превышают номинальные.

В дискретном режиме работы управление осуществляется через сигналы, передаваемые от САУ КЦ непосредственно на клеммы управления ПЧ через релейную схему в обход контроллера шкафа автоматики. При этом для повышения надежности системы сохранен приоритет управления от дискретных сигналов с САУ КЦ, то есть даже если вентилятор работает по алгоритму ПИ-регулирования, его можно включить на максимальную частоту.

Для нештатных ситуаций существует режим работы в местном

управлении непосредственно с двери шкафа управления.

Для устранения влияния частотно-регулируемых приводов на качество электроэнергии питающей сети применены ПЧ АВВ ACS 550 со встроенным сетевым дросселем.

В цепи питания электродвигателей вентиляторов после ПЧ установлены моторные дроссели, предназначенные для компенсации емкостных токов длинных моторных кабелей. Использование дросселей позволяет скомпенсировать емкостные токи и, соответственно, препятствует ложным срабатываниям защиты ПЧ от сверхтоков;

Кроме того, моторные дроссели обеспечивают снижение выбросов напряжения на обмотках двигателя и подавление высокочастотных гармоник тока двигателя, вызывающих дополнительный нагрев двигателя, а также ограничение амплитуды тока короткого замыкания.

Использование моторных дросселей способствует снижению скорости нарастания аварийных токов короткого замыкания и задержке момента достижения максимума тока короткого замыкания, что обеспечивает необходимое время для срабатывания цепей электронной защиты ПЧ.

Бесперебойная работа системы обеспечивается путем применения автоматического ввода резерва (ABP) и двух источников бесперебойного питания (ИБП). Один ИБП обеспечивает питание контроллера при пропадании напряжения на вводах, другой ИБП обеспечивает автоматический перезапуск двигателей при появлении напряжения на вводах путем сохранения питания релейной схемы.

Безопасная работа системы обеспечивается с помощью работы кнопочных постов ABO газа. При нажатии кнопки «стоп» на кнопочном посту, вентилятор останавливается по алгоритму аварийного останова за минимально возможное время. При этом срабатывает блокировка повторного включения вентилятора, то есть его невозможно включить пока не нажата кнопка «пуск» на кнопочном посту.

Для обеспечения нормального температурного режима в КТП АВО газа

установлена система вентиляции, регулирующая частоту вращения вытяжных вентиляторов в зависимости от температуры воздуха в КТП. При срабатывании пожарной сигнализации, система автоматически закрывает воздушные клапаны и останавливает вытяжные вентиляторы.

На рисунке 5.2-1 показан главный экран автоматизированного рабочего места системы управления ABO газа, на рисунке 5.2-2 – окно управления вентилятором.







Рисунок 5.2.2 - Окно управления вентилятором автоматизированного рабочего места системы управления АВО газа

5.2 Экспериментальное исследование САУ АВО газа

При технической реализации использован вариант 3 построения системы. Структурная схема системы по этому варианту в соответствии с разделом 2 приведена на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Структурная схема САУ

САУ содержит в прямой цепи пропорционально-интегральный регулятор с ПФ

$$W_R(p) = \frac{(T_{R1}p+1)}{T_{R2}p}$$

постоянная времени регулятора для компенсации наибольшей постоянной времени – постоянной объекта управления принята равной

$$T_{R1} = T_{o}$$

Постоянная времени интегрирующего преобразования регулятора в соответствии с результатам, полученными в разделе 2, принята равной

$$T_{R2} = bk_{o1}k_Ek_DT_D = bk_p T_D,$$

где для обеспечения минимального времени переходного процесса при допустимом перерегулировании меньшем 5 % принято *b*=2,4.

Фильтр выполнен в виде апериодического звена с постоянной времени, равной постоянной времени объекта

$$W_f(p) = \frac{1}{T_0 p + 1}$$

Переход от относительных единиц к именованным при моделировании переходных процессов выполнен с учетом соотношений

$$T_0 = 120 \text{ c}; T_{R2} = 2,4 k_p T_D = 28,8 \text{c}; T_E = 0,01 T_0 = 0,12 \text{ c}.$$

Расчетный график переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов для единичного ступенчатого изменения сигнала задания температуры газа $f_{\text{расч}}^*$, о.е. приведен на рисунке 5.4.

Расчетный график переходного процесса изменения температуры газа на выходе АВО $\Theta^*_{\text{вых}}$, о.е. для единичного ступенчатого изменения сигнала задания температуры приведен на рисунке 5.5.



Рисунок 5.4 – Расчетный график переходного процесса изменения частоты f_{pac}^{*} t, с Результаты обработки экспериментальных данных для рассматриваемого переходного процесса приведены в таблицах 5.1...5.3.

Результаты обработки экспериментальных данных для рассматриваемого переходного процесса приведены в таблицах 5.1...5.3.

В таблице 5.1 показаны результаты вращения для частоты вентиляторов. Здесь обозначено: t – время, c; f – частота вращения вентиляторов, Гц: f pacy расчетное значение вращения частоты o.e.; *f*_{расч} вентиляторов, расчетное значение частоты вращения вентиляторов, Гц.

На рисунке 5.6 приведен расчетный график (кривая $f_{\rm pacy}$) и график, построенный по экспериментальным данным (кривая *f*). Расчетные данные удовлетворительно согласуются с расчетными. Погрешность в определении показателей качества переходного процесса: времени регулирования и перерегулирования не превышает 10%.



Рисунок 5.5 – Расчетный график переходного процесса изменения температуры $\Theta^*_{_{BbX}}$

Таблица 5.1

<i>t</i> , c	<i>f</i> , Гц	$f^*_{\text{ расч}}$, o.e.	$f_{\sf pacч},$ Гц
0	0	0	0
10	6,7	0,32	9,8
20	14,9	0,60	18,5
30	23,9	0,80	24,6
40	31,7	0,92	28,4
50	31,7	0,98	30,2
60	31,8	1,03	31,7
70	31,7	1,04	32,2
80	31,5	1,03	31,9
90	31,4	1,02	31,6
100	31,3	1,02	31,4
110	31,1	1,01	31,1
120	31,0	1,00	31,0



Рисунок 5.6 – Расчетный график (кривая *f*_{расч}) и экспериментальный график (кривая *f*) переходного процесса изменения частоты

В таблице 5.2 показаны расчетные и экспериментальные данные для температуры газа на выходе ABO. Здесь дополнительно использованы обозначения: $\Theta_{вых}$ – температура газа на выходе ABO (экспериментальные результаты), °C; $\Theta_{вx}$ – температура газа на входе ABO (экспериментальные результаты), °C; $\Theta_{вых.расч}$ – расчетное значение температуры на выходе ABO, о.е.; $\Theta_{вых.расч}$ – расчетное значение температуры на выходе ABO, °C.

Расчетный график (кривая $\Theta_{вых.расч}$) изменения температуры газа на выходе ABO и график, построенный по экспериментальным данным (кривая $\Theta_{вых}$), приведены на рисунке 5.7. Наибольшее отклонение расчетных значений от экспериментальных наблюдается на начальном участке переходного процесса. В целом расчетная кривая переходного процесса удовлетворительно согласуется с экспериментальным графиком: переходный процесс носит апериодический характер, погрешность в определении времени переходного процесса не превышает 10%.

На рисунке 5.8 приведены совмещенные экспериментальные графики частоты вращения вентиляторов и температуры газа на выходе ABO при отработке ступенчатого изменения уставки температуры.

<i>t</i> , c	$\Theta_{\text{bbix}}, ^{\circ}\text{C}$	$\Theta_{{}_{BX,}}$ °C	$\Theta_{\text{вых.расч}}^*$, o.e.	$\Theta_{вых.расч}, °С$
0	27,3	31,2	0	27,3
10	27,3	31,2	0,02	27,0
30	27,3	31,2	0,10	26,0
60	27,1	31,2	0,30	23,6
90	25,7	31,2	0,45	21,8
120	23,6	31,1	0,58	20,2
150	21,5	31,1	0,66	19,2
180	19,9	31,2	0,75	18,1
210	18,6	31,2	0,80	17,5
240	17,7	31,1	0,84	17,0
270	17	31,2	0,87	16,6
300	16,5	31,2	0,90	16,2
330	16,1	31,1	0,92	16,0
360	15,9	31,2	0,94	15,7
390	15,6	31,2	0,95	15,6
420	15,5	31,2	0,96	15,5
450	15,4	31,2	0,96	15,4
480	15,2	31,2	0,97	15,4
510	15,1	31,2	0,98	15,2
540	15	31,1	0,98	15,2
570	15,1	31,1	0,98	15,2
600	15	31,2	0,99	15,1

Таблица 5.2 – Данные для температуры газа на выходе АВО



Рисунок 5.7 – Расчетный график (кривая $\Theta_{вых.расч}$) и экспериментальный график (кривая $\Theta_{вых}$) изменения температуры газа на выходе ABO



Рисунок 5.8 – Экспериментальные графики частоты вращения вентиляторов и температуры газа на выходе ABO

Вывод по подразделу

Анализ приведенных данных ПО исследованию динамических характеристик САУ свидетельствует об удовлетворительном согласовании расчетных данных с экспериментальными и подтверждает правильность положений допущений, принятых основных И при теоретическом исследовании.

5.3 Оценка экономии электроэнергии при использовании САУ АВО газа с ЧРП вентиляторов

Регулирования температуры газа на выходе установок охлаждения газа в большинстве находящихся в эксплуатации установок осуществляется дискретно – включением/отключением вентиляторов АВО. При таком регулировании включение каждого вентилятора приводит к изменению мощности ΔP_1 И соответствующему приращению температурного перепада $\Delta \theta_1$, что иллюстрирует график на рисунок 5.9 [3]. Графики на рисунке 5.9 построены В относительных единицах: единицу 3a

температурного перепада принято значение температурного перепада $\Delta \theta^*$ на УОГ при включении всех двигателей вентиляторов; за единицу мощности – суммарная мощность P_{Σ} двигателей вентиляторов АВО.

Значение температурного перепада на УОГ в именованных единицах может быть определено для конкретных условий на основе тепловых характеристик ABO, приведенных в разделе 2. Учитывая, что УОГ должна обеспечить некоторый требуемый температурный перепад, приведенный график позволяет определить требуемую для этого мощность двигателей вентиляторов.



Рисунок 5.9 – Взаимосвязь температурного перепада на УОГ и требуемой мощности на охлаждение газа

Более совершенным с энергетической точки зрения способом управления температурой на выходе УОГ является регулирование частоты вращения вентиляторов, осуществляемое с помощью частотнорегулируемого привода. Известно, что для вентиляторов мощность на валу зависит от частоты вращения *n* в третьей степени

$$P_{\rm чрп} = P_{\Sigma} \left(\frac{f}{f_{\rm H}}\right)^3,$$

где *f*_н- номинальная частота вращения двигателей вентиляторов, Гц.

Как показывают результаты экспериментальных исследований [10, 94], скорость потока воздуха, создаваемого вентиляторами, и температурный перепад связаны с частотой вращения вентиляторов примерно линейной зависимостью. С учетом этого последнее соотношение можно переписать в виде

$$P_{\text{чрп}} = P_{\Sigma} (\Delta \theta^*)^3$$
.

Соответствующий график, устанавливающий взаимосвязь между температурным перепадом и мощностью, необходимой для целей охлаждения, приведен на рисунке 5.9.

Экономия мощности при использовании ЧРП вместо дискретного регулирования определяется разностью ординат приведенных графиков

$$\Delta P = P_{\rm дp} - P_{\rm чpn}.$$

Максимальное значение экономии мощности составляет около 40%. Например, для типовой УОГ, содержащей 12 аппаратов, с двумя вентиляторами каждый, и приводными двигателями номинальной мощности *P*_н=37 кВт суммарная мощность двигателей равна $P_{\Sigma} = 888 \text{ kBt}.$ Соответственно экономия составит 335 кВт. максимальная около Приведенные соотношения могут использоваться для оценки экономической эффективности использования ЧРП, а также для прогнозных оценок максимальной мощности и потребления электроэнергии. Для расчетного определения электроэнергии необходима информация ЭКОНОМИИ 0 температуре наружного воздуха, производительности КС, технологических требованиях по температуре газа на выходе УОГ и др. В связи с этим в работе оценка экономии электроэнергии осуществлялась, путем сравнения расхода электроэнергии на нужды охлаждения газа до и после введения в эксплуатацию САУ [8, 9]. Использовались данные автоматизированной системы учета электроэнергии и системы учета режимов работы КС за 8 месяцев 2014 г., 2015 г. – при дискретном регулировании температуры газа на выходе установки охлаждения и данные за те же месяцы 2015 г., 2016 г. – после введения в эксплуатацию разработанной САУ. Оценивались: потребление электроэнергии W, тыс. кВт·ч; объем транспорта газа через УОГ Q, млн. м³; удельный расход электроэнергии на охлаждение газа. Соответствующие диаграммы приведены на рисунках 5.10...5.12.

На рисунке 5.10 приведена диаграмма потребления электроэнергии на охлаждение газа W, тыс. кВт·ч за 8 месяцев 2014 – 2015 гг.– при дискретном регулировании до внедрения САУ; и за те же месяцы 2015 – 2016 гг. после внедрения САУ. На рисунке 5.11 показана диаграмма объема транспорта газа Q, млн. м³ через УОГ. На рисунке 5.12 – удельный расход электроэнергии на нужды охлаждения

$$w = \frac{W}{Q}, \frac{\kappa \mathrm{BT} \cdot \mathrm{Y}}{\mathrm{тыс. } \mathrm{m}^3}.$$

Кроме того, учитывалась температура наружного воздуха $\Theta_{\rm HB}$ (рисунок 5.13).

Температура на входе в установку охлаждения газа и на ее выходе отличались несущественно.

Проанализируем полученные результаты.

Потребление электроэнергии на охлаждения газа (рисунок 5.10) по месяцам при использовании САУ ниже, чем при дискретном регулировании, за исключением сентября. Повышенный расход электроэнергии в сентябре 2015 г. по сравнению с тем же месяцем 2014 г. объясняется возрастанием (рисунок 5.11) примерно на 20 % объема транспорта газа, а также более высокой температурой (рисунок 5.13) наружного воздуха (примерно на 7 %). В целом за 8 месяцев 2015 – 2016 гг., несмотря на увеличение объема транспорта газа по сравнению с тем же периодом 2014 – 2015 гг. на 15,4 %, потребление электроэнергии уменьшилось на 481 тыс. кВт·ч или на 52,7 %. Следует отметить, что данные за март месяц 2015 г. и 2016 г. существенно отличаются от общего тренда изменения потребления электроэнергии. Частично это объясняется отличием температуры наружного воздуха в марте

месяце 2015 г. и 2016 г. Если в соответствии с терминологией, используемой при обработке экспериментальных данных, принять эти данные за«выброс» и исключить из рассмотрения, то снижение расхода электроэнергии за счет использования САУ АВО газа с ЧРП вентиляторов составляет около 22 %.

Наиболее информативным показателем эффективности режимов работы установки охлаждения газа, при прочих равных условиях, может служить удельный расход электроэнергии *w* на нужды охлаждения.



Рисунок 5.10 – Потребление электроэнергии на охлаждение газа, тыс. кВт·ч: ряд 1 – в 2014 – 2015 гг. – при дискретном регулировании; ряд 2 – в 2015 – 2016 гг. – при использовании САУ

Как следует из диаграммы (рисунок 5.13), этот показатель по месяцам, за исключением сентября, уменьшился после введение в эксплуатацию САУ. Больший удельный расход электроэнергии в сентябре 2015 г. обусловлен повышенной температурой наружного воздуха. В среднем за сравниваемые периоды, если исключить «выброс» в марте месяце сравниваемых годов, снижение удельного расхода электроэнергии за счет использования САУ



АВО газа с ЧРП вентиляторов составило 28 %.





Рисунок 5.12 – Удельное потребление электроэнергии на охлаждение газа, *w*, кВт·ч/тыс. м³: ряд 1 – в 2014 – 2015 гг. – при дискретном регулировании; ряд 2 – в 2015 – 2016 гг. – при использовании САУ



Рисунок 5.13 – Температура наружного воздуха $\Theta_{\rm HB}$, °C: ряд 1 – в 2014 – 2015 гг.; ряд 2 – в 2015 – 2016 гг.

Выводы по подразделу

Приведенные результаты свидетельствуют о повышении энергетической эффективности режимов работы установки охлаждения при использовании разработанной системы автоматического управления температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения: расход электроэнергии снизился примерно на 22 %; сокращение удельного расхода электроэнергии составило около 28 %. Следует отметить, значительный энергосберегающий эффект определяется, прежде всего, переходом от дискретного регулирования к непрерывному. Использование замкнутой САУ АВО обеспечивает точное поддержание заданного технологического режима охлаждения газа В условиях вариаций параметров внешней среды И минимизирует непроизводительный расход электроэнергии на нужды охлаждения. Более точному энергетических сравнению показателей препятствуют отличающиеся условия работы УОГ. В связи с этим полученные результаты следует рассматривать как оценочные.

127

Выводы по разделу

1 Результаты экспериментальных исследований динамических характеристик САУ свидетельствует об удовлетворительном согласовании расчетных данных с экспериментальными и подтверждают правильность основных положений и допущений, принятых при теоретическом исследовании.

2 По данным экспериментальных исследований использование разработанной САУ позволило примерно на 22 % снизить потребление электроэнергии и на 28 % уменьшить удельный расход электроэнергии на нужды охлаждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования решена научная задача, имеющая значение для развития электротехнических комплексов компрессорных станций магистральных газопроводов.

В работе получены следующие результаты:

1 C использованием разработанной методики проведена параметрическая идентификация объекта управления для конкретных условий работы КС. Проанализирован возможный диапазон вариаций параметров объекта. Установлено, ЧТО для КС работающих по производительности в режиме близком к номинальному в климатическом поясе с умеренным климатом, коэффициент передачи объекта изменяется не более, чем в 3...4 раза. При изменении производительности для KC. расположенных в регионах с континентальным климатом, диапазон вариаций коэффициента может достигать 8...10.

2 Выявлены требования к характеристикам САУ АВО газа, и исследованы характеристики традиционного варианта построения САУ с последовательно включенными регуляторами. Установлено, что в такой структуре без фильтра на входе не удается выполнить требования к качеству регулирования частоты вращения вентиляторов.

Рассмотрен вариант построения системы с ПИД-регулятором в прямой цепи и фильтром на входе в виде апериодического звена второго порядка. В результате проведенного исследования выявлено, что такой вариант САУ в условиях вариаций коэффициента передачи объекта управления в 3...4 раза обеспечивает необходимые показатели качества регулирования как для частоты вращения вентиляторов, так и для температуры газа на выходе ABO. Его недостатком является большое количество настраиваемых параметров.

3 Рассмотрен упрощенный вариант системы с ПИ-регулятором в прямой цепи и апериодическим фильтром на входе. Установлено, что переход к упрощенному варианту построения САУ при вариациях коэффициента передачи объекта управления в 3...4 раза ведет к несущественным потерям качества управления.

4 Предложена методика синтеза и исследована САУ АВО газа с ПДрегулятором в цепи обратной связи и И-регулятором в прямой цепи. Установлено, что такая структура в условиях вариаций коэффициента передачи объекта управления в 3...4 раза позволяет уменьшить количества настраиваемых параметров при сохранении показателей качества регулирования, присущих системам традиционной структуры.

5 Предложена методика синтеза и исследована структура двухконтурной САУ АВО газа. Показано, что ее использование позволяет обеспечить требуемое качество управления в условиях изменения коэффициента передачи ОУ в 10 раз.

6 Проведен сравнительный анализ исследованных систем и указаны предпочтительные структуры САУ АВО газа с учетом возможного диапазона вариаций параметров звеньев системы.

7 Анализ полученных промышленной установке на подтверждает экспериментальных данных высокую энергетическую эффективность использования САУ АВО газа с ЧРП вентиляторов, свидетельствует об удовлетворительном согласовании расчетных характеристик САУ АВО газа с экспериментальными, что обосновывает достоверность основных положений И допущений, принятых при теоретическом исследовании.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Представляют интерес дальнейшие исследования, направленные на создание робастных систем управления ABO газа, обеспечивающих требуемое качество управления технологическим процессом охлаждения газа в условиях широкого диапазона изменений внешних условий и параметров самого процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Абакумов, А. М. Автоматическое управление температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения [Текст] / А. М. Абакумов, С. В. Алимов, Л. А. Мигачева, В. Н. Мосин // Вестник Самарского Гос. технического ун-та. Сер. «Технические науки». – 2011. – № 1. – С. 151 – 158.

 Абакумов, А. М. Исследование системы автоматического управления температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения [Текст] / А. М. Абакумов, С. В. Алимов, Л. А. Мигачева, А. В. Мигачев // Известия вузов. Электромеханика. – 2014.– № 5. – С. 68 – 71.

3. Абакумов, А. М. Повышение энергоэффективности установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов [Текст] / А. М. Абакумов, А. В. Мигачев// Сб. трудов Международной научно-практической конференции. Ашировские чтения. Т. III : Проблемы энергетического обеспечения нефтегазового комплекса. – Самара: Самарский Гос. технический ун-т, 2015. – С. 27 – 31.

4. Абакумов, А.М. Автоматическое управление температурой в установках воздушного охлаждения газа [Текст] / А. М. Абакумов, А. В. Мигачев, Л. А. Мигачева // Modelowaniesystemamiwytworczymi. Monografie – PolitechnikaLubelska / redakja A. Cwic, J. Stamirowcki. – Lublin, 2015. – С. 49 – 55.

 Абакумов, А. М. Исследование системы управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа [Текст] / А. М. Абакумов,
 А. В. Мигачев, И. П. Степашкин // Известия вузов. Электромеханика. – 2016.
 – № 6. – С. 130 – 134.

Абакумов, А. М. Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов [Текст] / А. М. Абакумов [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 110 – 113.

7. Абакумов, А. М. Аналитическое и экспериментальное исследование стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных

станций магистральных газопроводов [Текст] / А. М. Абакумов, С. В. Алимов, Л. А. Мигачева // Вестник Самарского Гос. технического ун-та. Сер. «Технические науки». – 2010. – № 7. – С. 113 – 117.

 Абакумов, А. М. Оценка энергетической эффективности использования системы автоматического управления температурой газа на компрессорных станциях [Текст] / А. М. Абакумов, А. В. Мигачев // Сб. трудов Международной научно–практической конференции. Ашировские чтения. Т. II : Проблемы энергетического обеспечения нефтегазового комплекса. – Самара : Самарский Гос. технический ун–т, 2016. – С. 292 – 295.

9. Абакумов, А.М. Энергосбережение В установках охлаждения природного газа [Текст] / А. М. Абакумов, А. В. Мигачев, И. П. Степашкин // Материалы Международной научно _ практической конференции, посвященной 60 – летию высшего нефтегазового образования в республике Татарстан. Т. II: Достижения, проблемы и перспективы развития отрасли. – Альметьевск : Альметьевский Гос. нефтяной институт, 2016. – С. 61 – 63.

10. Алимов, С. В. Повышение энергоэффективности стационарных режимов работы установок охлаждения газа с частотно-регулируемым электроприводом: автореф. дис. канд. технических наук / С. В. Алимов. – Самара, 2011. – 24 с.

Алимов, С. В. Модернизация вентиляторов АВО газа при реконструкции
 КС МГ / С. В. Алимов, А. О. Прокопец, С. В. Кубаров // Газовая промышленность. – 2009. – № 4. – С. 54 – 56.

Алимов, С. В. Аппараты воздушного охлаждения газа: опыт эксплуатации и пути совершенствования / С. В. Алимов, В. А. Лифанов, О. Л. Миатов // Газовая промышленность. – 2006.– № 6. – С. 54 – 57.

 Алимов, С. В. Моделирование установившихся процессов теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения газа / С. В. Алимов, И. А. Данилушкин,
 В. Н. Мосин // Вестник Самарского Гос. технического ун-та. Сер. «Технические науки». – 2010. – № 2 (26) – С. 178–186.

14. Алимов, С. В. Модель теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения. Стационарный режим / С. В. Алимов, И. А. Данилушкин,

В. Н. Мосин // Математическое моделирование и краевые задачи: труды седьмой Всероссийской научной конф. с международным участием. Ч. II: Моделирование и оптимизация динамических систем и систем с распределенными параметрами. – Самара :СамГТУ, 2010. – С 13 – 16.

 Алимов, С. В. Экономический подход к охлаждению природного газа на КС МГ / С. В. Алимов, Е. Г. Зайцев, С. В. Кубаров // Газовая промышленность. – 2009.– № 3. – С. 46 – 47.

16. Артюхов, И. И. Направления и перспективы применения регулируемого электропривода на компрессорных станциях транспорта и хранения газа / И. И. Артюхов, И. И. Аршакян, А. В. Коротков, Н. В. Погодин // Электротехнические комплексы и силовая электроника. Анализ, синтез и управление: межвузовский науч. сборник. Саратовский Гос. технический унт. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2001. – С. 26 – 30.

17. Артюхов, И. И. Применение энергосберегающего электропривода в системах водоснабжения / И. И. Артюхов, И. П. Крылов, В. Г. Абрамов // Вопросы преобразовательной техники, частотного электропривода и управления: межвузовский науч. сборник. – Саратов : Саратовский Гос. технический ун-т, 1998. – С. 97 – 102.

18. Артюхов, И. И. Применение энергосберегающего электропривода в системах автоматического регулирования температуры агрегатов воздушного охлаждения / И. И. Артюхов, И. П. Крылов, Н. В. Погодин // Вопросы преобразовательной техники, частотного электропривода и управления: межвузовский науч. сборник. – Саратов : Саратовский Гос. технический ун-т, 1997. – С. 53 – 56.

Артюхов, И. И.Энергосберегающий электропривод на объектах магистрального транспорта и хранения газа / И. И. Артюхов, И. П. Крылов, А. В. Коротков, Н. В. Погодин // Энергосбережение в Саратовской области. – 2002. – № 4. – С. 32 – 34.

20. Артюхов, И. И. Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа /

И. И. Артюхов, И. И. Аршакян, И. П. Крылов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – №1. С. 33 – 36.

21. Артюхов, И. И. Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях / И. И. Артюхов, И. И. Аршакян, Р. Ш. Тарисов, А. А. Тримбач, Е. В. Устинов // Вестник Саратовского Гос. технического унта. – 2011. – № 1 (54) вып. 3. – С. 25 – 32.

22. Артюхов, И. И. Система управления частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов установки охлаждения газа с применением нечеткой логики / И. И. Артюхов, Р. Ш. Тарисов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – (Электронный журнал) URL: http://www.science-education/ru/105-7149.

23. Аршакян, И. И. Повышение эффективности электротехнических комплексов установок охлаждения газа :автореф. дис. канд. технических наук / И. И. Аршакян. – Саратов, 2004. – 22 с.

24. Аршакян, И. И. Применение микропроцессорных устройств в системах электроснабжения компрессорных станций магистрального транспорта газа / И. И. Аршакян, А. В. Коротков, Н. В. Погодин, И. И. Артюхов, С. Ф. Степанов, Б. Ю. Порозов // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2002) : материалы 5-й юбилейной международной научно-технической конференции, Саратов, 18 – 19 сентября 2002 г. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2002. – С. 386 – 391.

25. Бахмат, В. Г. Аппарат воздушного охлаждения на компрессорных станциях / В. Г. Бахмат, Н. В. Еремин, О. А. Степанов. – СПб : Недра, 1994. – 102 с.

26. Бекиров, Т. М. Первичная переработка природных газов. /
Т. М. Бекиров. – М. : Химия, 1987. – 256 с.

 Белоусенко, И. В. Энергетика и электрификация газовых промыслов и месторождений / И. В. Белоусенко, Г. Р. Шварц, В. А. Шпилевой. – Тюмень : Тюмень, 2000. – 274 с.

28. Бикчентай, Р. Н. Влияние температуры транспортируемого газа на

топливно-энергетические затраты КС / Р. Н. Бикчентай, А. Н. Козаченко, Б. П. Поршаков // Газовая промышленность. – 1991. – № 2. – С. 19 – 21.

29. Бикчентай, Р. Н. Оптимизационные расчеты установок воздушного охлаждения газа в АРМ диспетчера КС / Р. Н. Бикчентай, М. М. Шпотаковский, В. С. Панкратов // Обзор.информ.: сер. автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. – М. : ИРЦ Газпром, 1993. – 35 с.

Бочкарева, И. И. Обеспечение электромагнитной совместимости частотно-регулируемых установок охлаждения газа с источниками электроснабжения : автореф. дис. .канд. технических наук / И. И. Бочкарева. – Саратов, 2012. – 18 с.

Бузуляк, Б.В. Концепция и программа реконструкции российских газопроводов / Б. В. Бузуляк, Е. В. Леонтьев, А. М. Бойко // Газовая промышленность. – 1993. – № 8. – С. 47.

32. Булатова, Д. А. Оптимизация комбинированных систем охлаждения газоперерабатывающих и нефтеперерабатывающих производств: автореф. дис. канд. технических наук / Д. А. Булатова. – Саратов, 2004. – 21 с.

33. Володин, В. И. Оптимизация теплообменников воздушного охлаждения
/ В. И. Володин // Теплоэнергетика. – 1994. – № 8. – С. 43 – 47.

34. Ванчин, А. Г. Расчет работы узла воздушного охлаждения газа в условиях компрессорной станции магистрального газопровода [Электронный ресурс] / А. Г. Ванчин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2013. – Вып. № 3. – С. 164 – 179. – Режим доступа : http://www.ogbus.ru. – (Дата обращения : 10.09.2014).

35. Васильев, Ю. Н. Системы охлаждения компрессорных и нефтеперекачивающих станций / Ю. Н. Васильев, Г. А. Марголин – М. : Недра, 1977. – 222 с.

36. Видманов, Ю. И. Об одном методе управления нестационарными объектами / Ю. И. Видманов, А. М. Абакумов // Сб. «Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок». –

Куйбышев :КПтИ, – 1973 – С. 176 – 179.

37. Гаррис Н. Активизация коррозионных процессов на магистральных газопроводах большого диаметра при импульсном изменении температуры [Электронный ресурс] / Н. Гаррис, Г. Аскаров // Нефтегазовое дело. – 2006. – Вып. № 1. – Режим доступа : http://www.ogbus.ru (Дата обращения : 20.10.2015).

38. Данилушкин, А. И. Оптимизация энергопотребления установок воздушного охлаждения газа. /А. И. Данилушкин, Л. А. Мигачева, В. Н. Мосин, В. Г. Крайнов.// Сб. научных трудов 1-ой Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург, 2011. – Стр. 92 – 94.

39. Данилушкин, А. И. Оптимальное управление распределением нагрузки между электроприводами установки охлаждения газа с учетом их энергетической эффективности / А. И. Данилушкин, В. Г. Крайнов, Л. А. Мигачева // Вестник Самарского Гос. технического ун-та. Серия «Технические науки». – 2012. – № 1 (33). – С. 119 – 126.

40. Данилушкин, А. И. Оптимизация стационарного распределения нагрузки аппаратов воздушного охлаждения газа / А. И. Данилушкин, В. Г. Крайнов, Л. А. Мигачева // Вестник Самарского Гос. технического унта. Серия «Технические науки». – 2011. – № 3 (31). – С. 159 – 164.

41. Данилушкин, А. И. Повышение энергоэффективности системы подготовки и транспортировки газа в нестационарных режимах работы магистрального газопровода / А. И. Данилушкин, Л. А. Мигачева, В. Г. Крайнов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С.114 – 117.

42. Дехтяренко, П. И. Определение характеристик звеньев систем автоматического регулирования / П. И. Дехтяренко, В. П. Коваленко – М. : Энергия, 1973. – 118 с.

43. Долотовская, Н. В. Оптимизация структуры систем комбинированного охлаждения установок транспорта природного газа. / Н. В. Долотовская, Д. А. Булатова // Электро– и теплотехнические процессы и установки:

межвузовский науч. сб. – Саратов : СГТУ, 2003. – С. 299 – 303.

44. Евенко, В. И. Влияние структуры эксплуатационных затрат на эффективность теплообменных аппаратов / В. И. Евенко // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1997. – № 3. – С.17 – 19.

45. Евенко, В. И. Оптимизация энергетического показателя теплообменного аппарата / В. И. Евенко // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1995. – № 1. – С. 7 – 12.

46. Егоров, А. И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами / А. И. Егоров. – М. : Наука, 1978. – 464 с.

47. Завальный, П. Н. Оптимизация работы сложной газотранспортной системы / П. Н. Завальный // Газовая промышленность. – 2002. – № 9. – С. 56 – 59.

48. Иванов, И.С. Экспериментальное определение И моделирование расчетных характеристик аппаратов воздушного охлаждения газа на [Электронный магистральных газопроводах pecypc] И. С. Иванов, / С. В. Китаев, А. Р. Гадельшина // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – Вып. № 4. – С. 118 – 131. – Режим доступа : http://www.ogbus.ru. – (Дата обращения : 15.12.).

49. Камалетдинов, И. М. Коэффициенты теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения (ABO) газовой промышленности / И. М. Камалетдинов, Ф. Ф. Абузова // Проблемы энергетики. – 2002. – № 3-4. – С. 20 – 23.

50. Камалетдинов, И. М. Энергосбережение при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах: автореф. дис. канд. технических наук / И. М. Камалетдинов. – Уфа, 2002. – 24 с.

51. Каменских, И. А. Энергосберегающая технология транспорта газа / И. А. Каменских // Научные проблемы Западно-Сибирского нефтегазового региона : гуманитарные, естественные и технические аспекты: тезисы докл. научно-технической конференции, Тюмень, 14 – 17 декабря 1999 г. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, – 1999. – С. 307 – 308.

 Кафаров, В. В. Математические основы автоматизированного проектирования химических производств / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин,
 В. Л. Перов. – М. : Химия, 1979. – 320 с.

53. Кафаров, В. В. Оптимизация теплообменных аппаратов и систем. /
В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин, Л. В. Гурьева. – М. :Энергоатомиздат, 1988.
– 192 с.

54. Кочергин, В. И. Расчет процессов охлаждения в условиях газовой промышленности и газонефтепереработки / В. И. Кочергин. – М. : МИНГ им. И. М. Губкина, 1988. – 78 с.

55. Кошляков, Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М. : Высшая школа, 1970. – 710 с.

56. Крайнов, В. Г. Оптимизация режимов работы электроприводов установок охлаждения газа при транспортировке: автореф. дис. .канд. технических наук / В. Г. Крайнов. – Самара, 2014. – 24 с.

57. Крылов, Г.В. Эксплуатация газопроводов Западной Сибири / Г. В. Крылов, А. В. Матвеев, О. А. Степанов, Е. И. Яковлев. – М.: Недра, 1985. – 288 с.

 Крюков, Н. П. Аппараты воздушного охлаждения / Н. П. Крюков. – М. : Химия, 1983. – 168 с.

59. Крючков, А. В. Оптимальное управление технологическим процессом магистрального транспорта газа / А. В. Крючков // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. – М. :ВСПУ, 2014. – С. 4602 – 4612.

60. Кузнецов, В. А. Особенности математической модели асинхронного электродвигателя аппаратов воздушного охлаждения масла [Текст]/ В. А. Кузнецов, А. В. Стариков, А. В. Мигачев, А. Р. Титов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2011. – № 3 (31). – С. 171 – 179. Кумар, Б. К. Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа / Б. К. Кумар, П. И. Выгонюк // Вестник Казахского

Нац. технического ун-та им. К. И. Сатнаева. – 2011. – № 1 (83). – С. 67 – 71. 61. Лапаев, Д. Н., Мочалин Д.С., Титов В.Г. Управление системой воздушного охлаждения газа компрессорных станций / Д. Н. Лапаев, Д. С. Мочалин, В. Г. Титов // Труды Нижегородского Гос. технического ун-та им. Р. Е. Алексеева. – 2014. – № 5 (107). – С. 79 – 83.

62. Ларин, Е. А. Энергетическая эффективность систем воздушного охлаждения И аппаратов воздушного охлаждения : инструктивноуказания расчету / Е. А. Ларин, Н. В. Долотовская, методические К Д. А. Булатова. – Саратов : СГТУ, 2002. – 45 с.

63. Меньшов, Б. Г. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности : учеб. / Б. Г. Меньшов, М. С. Ершов, А. Д. Яризов. – М. : Недра, 2000. – 487 с.

64. Методика теплового и аэродинамического расчета аппаратов воздушного охлаждения. – М. :ВНИИнефтемаш, 1974. – 101 с.

65. Методы классической и современной теории автоматического управления : Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 616 с.

66. Мигачев, А.В. Исследование характеристик аппарата воздушного охлаждения газа как объекта управления [Текст] / А. В. Мигачев // Научно– технический вестник Поволжья. – 2015. – № 6. – С. 175 – 179.

67. Мигачев, А. В. Параметрическая идентификация аппарата воздушного охлаждения газа как объекта управления [Текст] / А. В. Мигачев, В. А. Потемкин, И. П. Степашкин // Материалы VIII Всероссийской с международным участием научно–практической конференции «Актуальные исследования гуманитарных, естественных, общественных наук». – Новосибирск : ООО «ЦРСНИ». – 2016. – С. 23 – 28.

68. Микаэлян, Э. А.Топливно-энергетические затраты в магистральном транспорте газа / Э. А. Микаэлян // Газовая промышленность. – 2002. – № 5. – С. 82 – 85.

 Мочалин, Д. С. Инвариантная система управления электроприводами воздушного охлаждения газа :автореф. дис. канд. технических наук / Д. С. Мочалин. – Нижний Новгород, 2014. – 18 с.

70. Мушик, Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик,
П. Мюллер. – М. : Мир. – 1990. – 208 с.

71. Новак, М.Оптимизация режима включения установки охлаждения газа с наименьшими энергетическими затратами для выхода на штатный режим эксплуатации газопровода :автореф. дис. канд. технических наук / М. Новак. – М., 2004. – 26 с.

72. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике газовой промышленности / И. В. Белоусенко, Г. Р. Шварц, С. Н. Великий. – М. : Недра, 2002. – 300 с.

73. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде /
В. Д. Ногин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. :Физматлит, 2005. – 176 с.

74. Омельянюк М. В. Повышение экономичности и безопасности
эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения / М. В. Омельянюк,
А. Н. Черномашенко // Нефтепромысловое дело. – 2009. – № 4. – С. 43 – 46.

75. Пат. 2487290 Российская Федерация, МПК⁷С1 F16N 39/02, F04D 27/00. Система управления аппаратом воздушного охлаждения масла [Текст] / Алимов С. В., Мигачева Л. А., Мигачев А. В., Стариков А. В., Титов А. Р.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Самарский гос. технический ун–т. – № 2012101731/06; заявл. 18.01.2012; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19. – 9 с.

76. Пат. 2525040 Российская Федерация, МПК⁷С1 F16N 39/02. Система управления аппаратом воздушного охлаждения масла [Текст] / Алимов С. В., Мигачева Л. А., Мигачев А. В.,Стариков А. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Самарский гос. технический ун–т. – № 22012154492/06; заявл. 14.12.2012;

опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22. – 10 с.

77. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М. : Наука, 1982. – 256 с.

78. Рапопорт, Э. Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока: конспект лекций / Э. Я. Рапопорт. – Куйбышев : КПТИ, 1985. – 56 с.

79. Растригин, Л. А. Введение в идентификацию объектов управления / Л. А. Растригин, Н. Е. Маджаров. – М. : Энергия, 1977. – 215 с.

80. РД 153-39.0-112-2001. Методика определения норм расхода и нормативной потребности в природном газе на собственные технологические нужды магистрального транспорта газа. – Введ. 2002-01-01. – М.: ВНИИГАЗ, 2001. – 57 с.

 Рей, У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей; [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1983. – 368 с.

Розен, В. В. Цель – оптимальность – решение / В. В. Розен. – М. : Радио и связь, 1982. – 169 с.

Рыбин, А. И. Экономия электроэнергии при эксплуатации воздушных компрессорных установок / А. И. Рыбин, Д. Г. Закиров. – М. :Энергоатомиздат, 1988. – 72 с.

84. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати,
К. Кернс; [пер. с англ.]. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.

Седых, А. Д. Справочник по автоматизации в газовой промышленности /
 А. Д. Седых, М. М. Майоров, В. В. Дубровский. – М. : Недра, 1990. – 372 с.

86. Сингаевский, Н. А. Оптимальные по быстродействию диаграммы изменения температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения / Н. А. Сингаевский, Ю. П. Добробаба, А. А. Шаповало // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 76 (02). – С. 1 – 14.

87. Соболь, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболь, Р. Б. Статников. – М. : Наука, 1981. – 200 с.

88. Справочник по автоматизации в газовой промышленности / А. Д. Седых

[и др.]. – М. : Недра, 1990. – 372 с.

89. Степанов, О. А. Охлаждение масла и газа на компрессорных станциях /
О. А. Степанов, В. А. Иванов. – Л. : Недра, 1982. – 143 с.

90. Струченков, В. И. Методы оптимизации в прикладных задачах /
В. И. Струченков. – М. : Солон-Пресс, 2009. – 320 с.

91. Сухарев, А. Г. Курс методов оптимизации: учеб.пособие / А. Г. Сухарев,
А. В. Тимохов, В. В. Федоров. – 2-е изд. – М. : Физматлит, 2005. – 368 с.

92. Тарисов Р. Ш. Адаптивная система управления электроприводом вентиляторов установок охлаждения газа :автореф. дис. канд. технических наук / Р. Ш. Тарисов. – Саратов, 2011. – 24 с.

93. Тримбач, А. А. Совершенствование электротехнических комплексов установок охлаждения компримированного газа :автореф. дис. канд. технических наук / А. А. Тримбач. – Саратов, 2007. – 24 с.

94. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования / Ф. Фрер,
Ф. Ортенбургер; [пер. с англ.]. – М. : Энергия, 1973. – 423 с.

95. Черников, В. Ф. Оптимизация режимов участка магистрального газопровода / В. Ф. Черников, С. А. Джамирзе, А. Г. Ишков // Газовая промышленность. – 2010. – № 9. – С. 42 – 44.

 Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.

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

98. Шарипов, М. И. Повышение энергоэффективности аппаратов воздушного охлаждения нефтегазовой отрасли совершенствованием методов проектирования и изготовления / М. И. Шарипов, Р. Г. Абдеев // Вестник Оренбургского Гос. ун-та. – 2008. – № 11. – С. 132 – 135.

99. Шварц, Г. Р. Применение регулируемого электропривода в технологиях транспорта нефти и газа. Книга 1 / Г. Р. Шварц, А. М. Абакумов, Л. А. Мигачева. – М. : Машиностроение-1, 2008. – 240 с.

100. Шпилевой, В. А.Современные проблемы энергоснабжения и энергосбережения нефтегазового комплекса / В. А. Шпилевой // Науч.технические проблемы Западно-Сибирского нефтегазового комплекса. – 1995. – № 1. – С. 162 – 165.

101. Шпилевой, В. А.Энергетика, экономика и энергосбережение нефтегазового комплекса / В. А. Шпилевой // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1998.
– № 1. – С. 107 – 112.

102. Шпилевой, В. А.Энергетические проблемы добычи и транспорта нефти и газа / В. А. Шпилевой // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1997. – № 1. – С. 100 – 106.

103. Шпилевой, В. А.Энергоэкономические аспекты энергосбережения нефтегазового комплекса / В. А. Шпилевой, И. А. Каменских // Научные проблемы Западно-Сибирского нефтегазового региона : гуманитарные, естественные и технические аспекты : тезисы докладов научно- технической конференции, Тюмень, 14 – 17 декабря 1999 г. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 1999. – С. 305 – 307.

104. Шпотаковский, М. М.Энергосбережение при трубопроводном транспорте природного газа / М. М. Шпотаковский // Газовая промышленность. – 1998. – № 11. – С. 19 – 21.

105. Шпотаковский, М. М.Энергосбережение при трубопроводном транспорте природного газа / М. М. Шпотаковский // Газовая промышленность. – 2001. – № 3. – С. 28 – 30.

106. Шпотаковский, М. М. Энергосбережение при эксплуатации газопровода большого диаметра / М. М. Шпотаковский // Газовая промышленность. – 2004. – № 3. – С. 49 – 51.

107. Шпотаковский, М. М.Энергосбережение при эксплуатации КС / М. М. Шпотаковский // Газовая промышленность. – 2002. – № 5. – С. 80 – 82. 108. Энергосбережение В системах теплоснабжения, вентиляции И кондиционирования воздуха: справочник: справочное пособие / Л. Д. Богуславский, [и др.]; под ред. Л. Д. Богуславского, В. И. Ливчака.- М. :Стройиздат, 1990. – 624 с.

109. Щербинин, С. В. Информационно-измерительная и управляющая система аппаратов воздушного охлаждения газа :автореф. дис. канд. технических наук / С. В. Щербинин. – Уфа, 2004. – 26 с.

110. Щербинин, С. В. Система автоматизированного управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа [Электронный ресурс] / С. В. Щербинин, Г. Ю. Коловертнов, А. Н. Краснов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2004. – С. 1 – 10. – Режим доступа : http://www.ogbus.ru. – (Дата обращения : 10.02.2015)

111. Ярунина, Н. Н. Оптимизация термодинамических параметров в теплотехническом процессе компримирования газа : автореф. дис. . канд. технических наук / Н. Н. Ярунина. – Иваново, 2009. – 23 с.

112. Язик, А. В. Системы и средства охлаждения природного газа /
А. В. Язик. – М. : Недра, 1986. – 200 с.

113. Linde, R. Advantage of pipelining gas at low temperatures/ R. Linde // Pipe Line Industry. – 1984. – vol. 55. – No 3. – P. 49 – 56.
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «АТРИ»

РФ, 443020, г. Самара, ул. Некрасовская 82, цокольный этаж, к. 2, 4-7,18, 19, 54 Тел./факс (846) 277-73-12 / (846) 332-00-06. e-mail: atri@inbox.ru ОКПО 79167938. ОГРН 1056315142641. ИНН/КПП 6315578935/631701001

UCX. N8/69 OF 12.10. 2016 n.

СПРАВКА об использовании результатов кандидатской диссертации А.В. Мигачева в ООО «АТРИ»

Выводы A.B. диссертации Мигачева И рекомендации «Совершенствование систем автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения частотно-регулируемым газа С приводом вентиляторов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы нашей организацией при выполнении хозяйственного договора тематике модернизации ПО оборудования воздушного охлаждения газа с дочерним обществом ПАО «Газпром» при перспективной промышленном внедрении системы автоматического управления температурой природного газа в установке охлаждения с частотно-регулируемым приводом вентиляторов на газокомпрессорной станции «Ново-Комсомольская».

Теоретические и прикладные результаты, полученные в диссертационной работе, позволили решить ряд практических задач, связанных с повышением технико-экономических показателей процесса охлаждения газа на компрессорной станции.

ATPP

Технический директор ООО «АТРИменной вод

В.А. Потемкин



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ ЧОУ ДПО «СЕРВИС-ЦЕНТР САМАРА»

443020, Самарская область, г. Самара, ул. Некрасовская, дом 82 тел. (846) 2-777-270

Uex. Nº 10/115 om 14.10.20162.

СПРАВКА

об использовании результатов кандидатской диссертации А.В. Мигачева в учебном процессе ЧОУ ДПО «Сервис-центр Самара»

Результаты диссертационной работы Мигачева А.В. «Совершенствование систем автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в семинарах по повышению квалификации и профессиональной переподготовки руководителей и специалистов ПАО «Газпром» по темам «Современный автоматизированный электропривод и перспектива его применения», «Автоматизация и управление процессами энергообеспечения», «Электроснабжение объектов добычи, транспорта, подземного хранения и переработки газа», «Энергетическое обследование и энергетический аудит предприятий газовой промышленности».

Теоретические и прикладные результаты, полученные в диссертационной работе, использованы также при внедрении новых систем автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения газа на газокомпрессорных станциях дочерних обществ ПАО «Газпром», что позволяет решать проблемы экономии электроэнергии, эффективного поддержания заданных температур газа и исключить сезонные переналадки аппаратов ABO газа.

Заместитель директора то учебной и научной рабол

Н.Д.Ефремова

146

17.10.2016	N₂	17.10-1
Ha №	от	

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования и их апробации

Настоящим актом подтверждается, что положения и результаты диссертационного исследования Мигачева Алексея Викторовича внедрены в научно-методическую и проектную деятельность ООО «ЦСРНИ».

Апробация результатов диссертационного исследования осуществлялась в форме выступления на VIII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Актуальные исследования гуманитарных, естественных, общественных наук» (Новосибирск, 17 октября 2016 г.) с докладом на тему: «Параметрическая идентификация аппарата воздушного охлаждения газа как объекта управления».

Директор ООО «Центр содействия развитию научных исследований»

Омельченко А.В. "Центр содействия развития 17.10.2016 научных исслебований