

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

На правах рукописи

Маслов Иван Петрович

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
ВЕНТИЛЯТОРА МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические
комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент Семькина И.Ю.

Кемерово – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Оценка современного состояния вопроса	11
1.1 Обзор нормативно-технической документации	11
1.2 Обзор научных публикаций	22
1.2.1 Вопросы аэрологии	22
1.2.2 Моделирование гидро-газодинамических процессов в тупиковых выработках	26
1.2.3 Автоматизированный электропривод ВМП	30
1.2.4 Краткие выводы по обзору научных публикаций	37
1.3 Технические средства	37
1.4 Результаты анализа и постановка задач	47
2 Предлагаемая система управления	52
2.1 Концепция системы управления	52
2.2 Математическое описание	56
2.2.1 Математическая модель системы вентиляции	56
2.2.2 Расчет параметров модели	63
2.3 Настройка параметров регуляторов	86
2.4 Результаты и выводы	88
3 Вычислительные и физические эксперименты	89
3.1 Анализ энергетической эффективности	89
3.2 Анализ качества регулирования состава рудничной атмосферы	99
3.3 Экспериментальные исследования	101
3.4 Результаты и выводы	113

Заключение	115
Список сокращений	117
Список литературы.....	118
Приложение 1	137
Приложение 2	138
Приложение 3	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Горная промышленность сегодня является одной из важнейших отраслей нашей страны. В 2012 г. Правительством РФ утверждена Программа развития угольной отрасли на период до 2030 г., предполагающая, рост добычи угля и уровня производительности труда. Реализация этих показателей приведет к повышению количества и мощности применяемой техники, что при отсутствии дополнительных мер увеличит вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Важным вопросом обеспечения безопасности ведения горных работ является поддержание нормальных параметров рудничной атмосферы, как по всей шахте, так и в ее отдельных участках. Состав рудничного воздуха полностью регламентируется нормативной документацией, а для его поддержания в установленных пределах в тупиковых выработках применяются системы местной вентиляции, которые для газовых шахт построены нагнетательный способ с применением вентиляторов местного проветривания (ВМП), устанавливаемых в выработке со свежей струей.

Для воздействия на состав рудничной атмосферы применяется ряд способов регулирования производительности ВМП, среди которых применение частотно-регулируемого электропривода. Этот способ дает возможность регулировать производительность вентилятора в автоматическом режиме при этом снижать количество потребляемой мощности. Подобные системы регулирования для вентиляторов общепромышленного назначения давно нашли применение на производстве и хорошо себя зарекомендовали. Однако в утвержденных в 2013 г. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору Правилах безопасности в угольных шахтах автоматическое регулирование производительности ВМП для обеспечения требуемого

состава рудничной атмосферы не упоминается, а частотное регулирование предлагается исключительно для плавного заполнения воздухопроводов. Эти обстоятельства обосновывают актуальность разработки системы управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом вентилятора местного проветривания угольных шахт, реализующей одновременно регулирование состава рудничной атмосферы с целью обеспечения безопасности горных работ и регулирование производительности вентилятора с целью обеспечения энергосбережения.

Степень разработанности. Проблемой аэрологии горных предприятий занимались А.С. Бурчаков, И.И. Медведев, Л.А. Пучков, К.З. Ушаков и др. В их работах собраны основополагающие сведения о горном деле с точки зрения безопасности ведения горных работ, на изложенные этими авторами принципы опираются и в настоящее время при разработке правил безопасности.

Процессы газодинамики в тупиковых выработках рассмотрены в работах А.А. Бакланова, Н.Н. Петрова, К.З. Ушакова, И.А. Чарного и др. Авторами предложены методы и подходы к моделированию газодинамических процессов в выработках.

Вопросами автоматизированного частотно-регулируемого электропривода, в т.ч. для угольной промышленности, занимались И.Я. Браславский, А.Б. Виноградов, П.Д. Гаврилов, Е.К. Ещин, Н.Ф. Ильинский, В.Г. Каширских, А.Е. Козярук, М.П. Костенко, Г.Б. Онищенко, В.В. Панкратов, С.Г. Соколовский, В.М. Терехов, В.С. Тулин, Ю.С. Усынин, Б.И. Фираго, Р.Т. Шрейнер и др.

Несмотря на большой объем проведенных работ в области как проветривания тупиковых выработок и систем автоматики для вентиляторов местного проветривания угольных шахт, так и частотно-регулируемого электропривода турбомеханизмов в целом, текущий уровень развития систем вентиляции местного проветривания свидетельствует, что вопрос создания автоматической системы управления ча-

стотно-регулируемым асинхронным электроприводом вентилятора местного проветривания угольных шахт до сих пор до конца не решен.

Цель работы – разработка системы управления для автоматизированного частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания угольных шахт, удовлетворяющей критериям безопасности и энергетической эффективности.

Идея работы заключается в использование возможностей частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания для поддержания параметров рудничной атмосферы в тупиковой выработке в пределах, установленных Правилами безопасности в угольных шахтах, а также регулирования производительности ВМП.

Задачи работы:

- анализ нормативно-технической документации, научных информационных источников и существующих схмотехнических решений автоматизированного электропривода вентиляторов местного проветривания тупиковых выработок;

- разработка математической модели системы вентиляции тупиковой выработки с учетом переходных процессов;

- разработка концепции построения системы управления электроприводом вентилятора местного проветривания, обеспечивающей регулирование состава рудничной атмосферы тупиковой выработки в соответствии с нормативно-технической документацией;

- разработка оригинальных алгоритмов и программных средств для системы управления частотно-регулируемого электропривода вентиляторов местного проветривания;

- проведение вычислительных экспериментов и экспериментальных исследований на физической модели, имитирующей тупиковую выработку для оценки энергетической эффективности электропривода вентиляторов местного проветривания;

– оценка полученных результатов с точки зрения нормативной документации, регламентирующей безопасность работы угольных шахт, и разработка рекомендаций по применению частотно-регулируемого электропривода для систем местного проветривания.

Методы исследований. Научные и практические результаты диссертационной работы получены с использованием методов:

- теории электропривода;
- теории автоматического управления;
- методов математического моделирования;
- компьютерного моделирования динамических процессов;
- методов планирования экспериментов и обработки результатов.

Основные научные положения.

1. Построение и исследование математической модели системы вентиляции тупиковой выработки возможно на основе использования конечно-элементного моделирования.

2. Многокритериальное управление на основе метода взвешивания позволяет обеспечить соответствие состава рудничной атмосферы в тупиковой выработке Правилам безопасности в угольных шахтах.

3. Достичь требуемого состава рудничной атмосферы можно только с использованием адаптивной системы управления электроприводом вентилятора местного проветривания.

4. Применение частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания позволяет повысить энергоэффективность функционирования вентилятора местного проветривания без снижения безопасности ведения горных работ в тупиковой выработке.

Научная новизна.

1. Разработана комплексная математическая модель системы местной вентиляции отличающаяся учетом переходных процессов в вентиляционной сети и выработке.

2. Предложено упрощенное математическое описание элементов системы местной вентиляции, позволяющее производить синтез системы управления методами линейной теории автоматического управления.

3. Предложена концепция построения системы управления, обеспечивающей регулирование производительности вентилятора местного проветривания и состава рудничной атмосферы тупиковой выработки, отличающаяся многокритериальной постановкой задачи управления.

4. На основе результатов идентификации объекта управления предложена методика формирования структуры адаптивных регуляторов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Предложенное математическое описание позволяет производить оценку качества и эффективности функционирования вентилятора местного проветривания на этапе проектных и пусконаладочных работ.

Разработанные программные средства могут использоваться при анализе энергоэффективности конкретных технических решений электропривода вентилятора местного проветривания в режиме заполнения воздуховода, а также в режиме нормальной работы.

Предложенные алгоритмы управления вентилятором местного проветривания могут быть применены для повышения эффективности функционирования ВМП при соблюдении Правил безопасности по отношению к составу рудничной атмосферы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определялась обоснованностью принятых допущений, корректностью используемого математического аппарата и экспериментальным подтверждением основных теоретических выводов.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Предложенная в работе система управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом вентилятора местного проветривания угольных шахт принята к внедрению в ООО «Кузбасский региональный горный центр охраны труда», г. Кемерово.

Научные результаты, полученные в работе, также используются в учебном процессе студентов КузГТУ направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль подготовки «Электропривод и автоматика» (квалификация – бакалавр) в дисциплинах «Системы управления электроприводов», «Адаптивные и интеллектуальные системы управления в электроприводе» и «Автоматизированный электропривод».

Апробация работы.

Основное содержание работы, ее отдельные положения и результаты докладывались и получили одобрение на следующих конференциях:

Международная научно-техническая конференция «Электрометрические преобразователи энергии» (г. Томск, 2013 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях» (г. Новокузнецк, 2012 г.); Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (г. Кемерово 2012 г.); Международная научно-практическая конференция Сагиновские чтения № 5 «Наука и образование – ведущий фактор Стратегии «Казахстан–2050» (Караганда, Казахстан 2013 г.); ежегодные научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава КузГТУ (г. Кемерово, 2012-2013 гг.).

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках гранта Прези-

дента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (шифр МК-1963.2013.8).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ, 4 из которых в изданиях из перечня рекомендованных ВАК для кандидатских диссертаций.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения, приложений и содержит 160 страницы текста, 42 рисунка, 18 таблиц и список литературы из 147 наименований.

1 ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

1.1 Обзор нормативно-технической документации

Горная промышленность имеет ряд специфических особенностей. Она отличается сложностью условий (особый микроклимат, значительные глубины, наличие горного давления и т.д.), большим количеством способов разработки месторождений, применением широкого ассортимента технологического оборудования.

По данным Министерства энергетики РФ угольная отрасль на 100 % представлена частными компаниями. Производственная мощность угледобывающих предприятий отрасли только за период 2004-2011 гг. выросла почти на 40 %. Объем добычи угля непрерывно растет и в 2011 г. был достигнут наивысший показатель добычи угля в постсоветской России – 336,1 млн т. Суммарная поставка российского угля потребителям составляет 300-350 млн т в год, а сальдированный финансовый результат в целом по отрасли превышает 120 млрд руб. [100].

В январе 2012 г. Правительство Российской Федерации утвердило разработанную Минэнерго долгосрочную «Программу развития угольной отрасли на период до 2030 года». Документ учитывает мероприятия действующих федеральных целевых программ, отраслевых стратегий и уже принятые решения правительства в отношении угольной отрасли. В основе программы лежит оценка перспектив спроса на российский уголь, исходя из прогнозируемой конъюнктуры внутреннего и внешнего рынков [101].

В рамках соответствующих подпрограмм и намеченных мероприятий предусматривается создание устойчивой инновационной системы для обеспечения угольной отрасли прогрессивными отечественными технологиями и оборудованием, научно-техническими и инновационными решениями. Произойдет снижение энергоемкости добычи и пе-

переработки угля не менее чем в 1,5 раза. Программа предполагает, что к 2030 г. добыча угля вырастет и составит 430 млн т (а с учетом Государственной Программы "Социально-экономическое развитие Дальнего Востока и Байкальского региона" возможен рост до 500 млн т) и будет осуществляться на 82 разрезах и 64 шахтах, а уровень производительности труда (добыча угля на одного занятого) в пять раз превысит показатель 2010 г. (9000 т и 1880 т соответственно). За весь период действия программы будет введено 505 млн т новых и модернизированных мощностей по добыче угля при выбытии 375 млн т мощностей неперспективных и убыточных предприятий и сокращении уровня износа основных фондов с 70 до 20 %.

Реализация этих показателей приведет к повышению количества и мощности применяемой техники, что при отсутствии дополнительных мер увеличит вероятность возникновения аварийных ситуаций. Тем не менее, удельный травматизм со смертельным исходом на 1 млн т добычи в 2011 г. снизился в целом по отрасли до 0,15 (2010 г. – 0,45), а на шахтах – до 0,35 (2010 г. – 1,22) [100].

Помимо программы развития угольной отрасли, Минэнерго России разработало «Программу по обеспечению дальнейшего улучшения условий труда, повышения безопасности ведения горных работ, снижения аварийности и травматизма в угольной промышленности, поддержания боеготовности военизированных горноспасательных, аварийно-спасательных частей на 2012-2013 гг.». Документ предусматривает продолжение планового выполнения комплекса системных мер по совершенствованию требований и условий по охране труда и промышленной безопасности, в том числе по вопросам проветривания и управления пылегазовым режимом шахт, готовности шахт к локализации и ликвидации аварий, безопасному ведению горных работ, поддержанию постоянной боеготовности военизированных горноспасательных частей, совершенствованию норм проектирования.

Таким образом, обязательным условием дальнейшего развития угольной промышленности является техническое перевооружение, в ходе которого необходимо обеспечить комплексную автоматизацию всех технологических процессов, включая вспомогательные, а применяемое оборудование должно быть максимально адаптировано к работе в условиях шахт, быть энергетически эффективным, иметь повышенную надежность и максимально отвечать требованиям безопасности.

Важным вопросом обеспечения безопасности ведения горных работ является поддержание нормальных параметров рудничной атмосферы, как по всей шахте, так и в ее отдельных участках, так как основной рудничного воздуха является смесь кислорода, азота, углекислого газа, паров воды, а также ядовитых примесей и пыли. К ядовитым примесям рудничного воздуха относятся: окись углерода, окислы азота, сернистый газ, сероводород. Кроме того, в рудничном воздухе могут присутствовать водород, аммиак, этан, этилен, ацетилен, компрессорные пары и газы, пары мышьяка и ртути, цианистый водород, газы распада радиоактивных веществ.

Состав рудничного воздуха полностью регламентируется нормативной документацией, для его поддержания в установленных пределах в тупиковых выработках применяются системы местной вентиляции. Так, возможны следующие способы построения систем местной вентиляции:

1. Нагнетательный.
2. Всасывающий.
3. Комбинированный.
4. За счет общешахтной депрессии.

Проветривание тупиковых выработок на газовых шахтах осуществляется, как правило, нагнетательным способом с помощью вентиляторов местного проветривания, устанавливаемых в выработке со

свежей струей. Организация процесса проветривания, выбор, установка и работа вентиляторов ВМП регламентируется Правилами безопасности в угольных шахтах (ПБ).

В качестве ВМП применяются как центробежные, так и осевые вентиляторы с электрическим или пневматическим приводом (для горных выработок, где применение электроэнергии запрещено ПБ).

Серийно выпускаются вентиляторы местного проветривания с электрическим приводом на мощность от 13 до 110 кВт (ГОСТ 6625-85), номинальной подачей от 3,65 до 20 м³/с. Расчет необходимой производительности вентилятора производится на стадии проектирования выработки, и рассчитывается на весь срок проходки (т.е. на максимально возможную протяженность). При этом, согласно ПБ, регулировка производительности вентилятора возможна не чаще чем один раз в месяц. Но если рассмотреть ситуацию более детально, то получается, что на начальном этапе проходки производительность вентилятора во много раз завышена, из-за этого нарушены нормальные условия труда горнорабочих, а допустимого уровня эти параметры достигают только к концу проходки тупиковой выработки.

Известны вентиляторы местного проветривания типа ВМ, ВМЦ, ВМЭ, ВМЭУ, ВМЭВО, ВМП и другие (ГОСТ 6625-85). Например, следующих типов:

- а) ВМ-3М и ВМ-4М – осевые, одноступенчатые с меридиональным ускорением потока, нерегулируемые с электрическим приводом (могут применяться также в системах общепромышленной вентиляции). Тип электродвигателя ВРМ-80L2 (для ВМ-3М) и ВРМ-100L2 (для ВМ-4М) мощностью соответственно 2.2 и 4 кВт;
- б) ВМ-5М и ВМ-6М – осевые, одноступенчатые с меридиональным ускорением потока, регулируемые, с электрическим приводом. Тип электродвигателя ВРМ-132М2 (для ВМ-

- 5М) или ВАОМ-62-2 (для ВМ-6М) мощностью соответственно 13 и 24 кВт;
- в) ВМ-8М и ВМ-12М – осевые, одноступенчатые с меридиональным ускорением потока, регулируемые, с электрическим приводом. Тип электродвигателя ВРМ-200L2 (для ВМ-8М) или ВРМ-280L4 (для ВМ-12М) мощностью соответственно 50 и 110 кВт;
- г) ВМЭУ-5 и ВМЭУ-6 – предназначены для проветривания тупиковых горных выработок шахт, возможно их использование при проходке тоннелей и штолен. Рассчитаны на работу, как с жесткими, так и гибкими трубопроводами 3 диаметром 500, 600, 800 (ВМЭУ-5) и 600, 800 (ВМЭУ-6) мм. Тип электродвигателя 2ВРМ132М2 мощностью соответственно 15 и 25 кВт;
- д) ВКМ-200А, ВМП-3М, ВМП-5М, ВМП-6М – одноступенчатые, снабжены пневматическим турбинным приводом и используются на шахтах крутого падения.

Существуют несколько способов регулирования производительности ВМП в процессе проходки тупиковой выработки[72]:

1. Изменением угла установки лопаток рабочего колеса.
2. Изменением сопротивления вентиляционной сети.
3. Изменением частоты вращения рабочего колеса.

В отличие от способов 2 и 3, способ регулирования производительности 1 не позволяет оперативно (в режиме реального времени) регулировать параметры работы вентилятора, для этого требуется остановка ВМП и только после этого регулировка. Способ 2 представляет собой изменение пропускной способности вентиляционного канала. Недостатками способов 1 и 2 является то, что не смотря на изменение подачи вентилятора он потребляет из сети электроснабжения по-

стоянное количество электроэнергии, определяющееся установленной мощностью ВМП.

С применением частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания (способ 3) возникает возможность регулировать производительность вентилятора вместе с потребляемой мощностью [146].

Подобные системы регулирования производительностью вентиляторов общепромышленного назначения давно нашли применение на производстве и хорошо себя зарекомендовали. Анализ информационных материалов производителей показал, что в модельном ряде каждого производителя имеется несколько преобразователей частоты, оснащенных специальными функциями для регулирования производительности турбомеханизмов. Не смотря на это, для горной промышленности до 2011 года применение преобразователей частоты даже для плавного заполнения вентиляционной сети не было предусмотрено в ПБ, а оперативное автоматическое регулирование производительности ВМП не регламентировано и в действующей редакции ПБ. Тем не менее, возможность частотного регулирования для плавного заполнения воздухопроводов, появившаяся в ПБ [23], снимает косвенный запрет на применение частотно-регулируемого электропривода ВМП как такового и обеспечивает техническую возможность для снижения динамических нагрузок на вентиляционную сеть, тем самым увеличить ресурс воздухопроводов, а также создает предпосылку для разработки системы управления для автоматизированного частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания угольных шахт, удовлетворяющей критериям безопасности и энергетической эффективности.

Работа угольных шахт регламентируется следующими нормативными документами по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в угольной промышленности: [1-38], из которых непосред-

ственно к проветриванию тупиковых выработок относятся следующие нормативно – технические документы: [5, 6, 7, 14, 15, 17, 23, 26].

Проанализировав нормативно-техническую документацию, требования к проветриванию тупиковых выработок можно разделить на требования к качеству рудничной атмосферы в выработке и требования к ВМП. Эти требования приводятся в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Требования к рудничной атмосфере в тупиковой выработки

Параметр	Место контролирования	Допустимые пределы
Концентрация метана	Исходящая из тупиковой выработки	< 1%
	Поступающая к забоям тупиковых выработок	< 0,5%
	Местные скопления метана в тупиковых выработках	< 2%
Концентрация оксида углерода	В местах наиболее вероятного возникновения пожаров	< 0,0017%
Концентрация кислорода	На рабочих местах	> 20%
Концентрация диоксида углерода	На рабочих местах и исходящих струях тупиковых выработок	<0,5%
Концентрация оксидов азота (в пересчете на диоксид азота)	В горных выработках	<0,00025%
Концентрация диоксида азота	В горных выработках	<0,00010%

Параметр	Место контролирования	Допустимые пределы
Концентрация сернистого ангидрида	В горных выработках	<0,00038%
Концентрация сероводорода	В горных выработках	<0,00070%
Запыленность воздуха	В исходящих вентиляционных потоках подготовительных выработок	<150 мг/м ³
Скорость воздуха	В призабойных пространствах очистных и тупиковых выработок	0,25 – 4 м/с

Таблица 2. Требования к ВМП

Требование	Описание
Место установки	ВМП с электрическим приводом, должен устанавливаться в выработке со свежей струей воздуха на расстоянии не менее 10 м от исходящей струи. Расстояние от конца вентиляционных труб до забоя в газовых шахтах не должно превышать 8 м, а в негазовых – 12 м.
Режим работы	ВМП должны работать непрерывно и управляться из диспетчерской шахты с помощью аппаратуры автоматического контроля и телеуправления ВМП.
Система управления	Система управления ВМП должна обеспечивать: 1) непрерывный автоматический контроль про-

Требование	Описание
	ветривания призабойной области (контроль скорости воздуха, поступающего к забою тупиковой выработки через воздухопровод, при этом данные сохраняются в архивах); 2) контроль и управление рабочим и резервным ВМП: а) контроль состояния пускателя ВМП (включен/выключен) и наличия напряжения на пускателях основного и резервного ВМП; б) автоматизированное местное, дистанционное и централизованное диспетчерское управление; в) включение рабочего или резервного ВМП, обеспечивающее плавное заполнение вентиляционного трубопровода воздухом (импульсный пуск при использовании пускателей и плавный пуск при использовании частотных преобразователей); г) автоматическое прямое (без плавного заполнения воздухопровода) включение резервного ВМП при отключении рабочего ВМП; д) автоматическое прямое (без плавного заполнения воздухопровода) повторное включение рабочего или резервного ВМП при восстановлении напряжения хотя бы на одном из пускателей в течение оперативно настраиваемого промежутка времени от 0 до 10 секунд с момента исчезновения напряжения питания; е) автоматическое повторное импульсное (с

Требование	Описание
	плавным заполнением воздуховода) включение рабочего или резервного ВМП при восстановлении напряжения хотя бы на одном из них в течение оперативно настраиваемого промежутка времени от 10 до 120 секунд с момента исчезновения напряжения питания и блокировку автоматического повторного включения пускателей при исчезновении питающего их напряжения на время более 120 секунд; ж) автоматическое выключение резервного ВМП при включении рабочего; 3) автоматический перевод на резервную линию электропитания при исчезновении напряжения в рабочей линии и обратно при восстановлении напряжения рабочей сети, если электропитание осуществляется не от источников с аккумуляторной поддержкой; 4) световую и (или) звуковую местную (на подземном устройстве контроля и управления, пульте управления) сигнализацию и телесигнализацию (на рабочем месте оператора АГК) о работе рабочего и резервного ВМП, о нарушении проветривания призабойной области (снижении скорости воздуха, подаваемого к забою ниже порогового уровня, отказе датчика скорости воздуха), о наличии основного и резервного напряжения, о снятии блокировки на включение ГА и о состоянии ГА;

Требование	Описание
	5) нормальную работу резервного (рабочего) ВМП при отключении на ремонт и для профилактических осмотров на пускателе рабочего (резервного) ВМП, при этом с электрооборудования в забое снимается напряжение; 6) возможность оперативной настройки параметров алгоритма управления ВМП: а) параметров процесса плавного запуска вентиляторов: для ВМП с пускателями: длительность импульса в диапазоне от 1,5 до 3,0 секунд; длительность паузы между импульсами - от 6 до 10 секунд; число импульсов - от 3 до 10 шт.; для ВМП с частотным преобразователем: длительность разгона двигателя - в диапазоне от 30 до 120 секунд; б) параметров процесса повторного запуска ВМП: выдержка времени от 0 до 10 секунд с момента исчезновения напряжения питания для прямого повторного включения рабочего или резервного ВМП при восстановлении напряжения хотя бы на одном из них; выдержка от 60 до 120 секунд с момента исчезновения напряжения питания для импульсного повторного включения рабочего или резервного ВМП при восстановлении напряжения хотя бы на одном из них;

Таким образом, приведенный анализ свидетельствует, что с точки зрения проветривания тупиковых выработок основным недостатком

нормативно-технической документации является наличие большого количества регламентирующих документов и отсутствие единого систематизированного источника. С точки зрения регулирования производительности вентилятора местного проветривания, данная операция разрешается не чаще одного раза в месяц [23], а применение преобразователя частоты в качестве регулятора производительности вентилятора в нормативной документации не предусмотрено, хотя применение его для плавного заполнения вентиляционной сети разрешается.

1.2 Обзор научных публикаций

Вопросы проветривания выработок и поддержания в них нормальных условий интересуют научное сообщество со времен начала развития горного дела.

Процесс проветривания выработок сложный и нестационарный, в связи с чем, имеет смысл рассмотреть его с различных точек зрения:

1. С позиции аэрологии.
2. Как объект для моделирования нестационарных процессов.
3. Относительно вариантов автоматизации электрического привода вентиляторных установок.

1.2.1 Вопросы аэрологии

Аэрология горных предприятий получала большое развитие в нашей стране при активной механизации горного производства после Великой отечественной войны. Большой вклад в развитие рудничной аэрологии внесли А.А. Скочинский, А.С. Попов, М.М. Протоdjяконов, В.Б. Комаров, Д.Ф. Борисов, А.И. Ксенофонтова, В.Н. Воронин, А.Ф. Абрамов, Л.Н. Быков, И.М. Печук, П.И. Мустель, А.М. Карпов, А.Н. Щербань, Г.Д. Лидин, А.Ф. Воропаев, И.И. Медведев, К.З. Ушаков и др.

В работах этих авторов дан анализ состава рудничного воздуха, изучен состав газов земной коры, исследованы взрывчатые свойства

шахтной пыли и методы борьбы с нею, исследован тепловой режим шахты, разработаны методы автоматического управления вентиляцией шахт, исследованы особенности вентиляции шахт при подземных пожарах, внезапных выбросах угля и газа и др., разработаны методы проектирования вентиляции шахт, исследованы процессы газовыделения в горные выработки и переноса газов вентиляционными потоками, а также исследована надежность вентиляционных систем и разработаны методы ее оценки.

Не смотря на фундаментальность работ перечисленных авторов, большую освещенность вопроса аэрологии и безопасного ведения горных работ, исследования в этой области продолжаются и по сей день. Работы направлены в сторону оптимизации систем проветривания, модернизации оборудования, разработку новых способов ведения работ. Все это подтверждается анализом научных публикаций по этой теме.

Так в работе А.М. Голышева, Э.В. Серебrenикова, А.В. Давыдова, Е.В. Пищиковой «Распространение вредных газов в тупиковой горной выработке» [56] получено общее решение задачи распределения в пространстве и времени опасных газов в тупиковой горной выработке на примере распространения СО после взрыва.

В статье К.Х. Ли «Текущий прогноз метановыделения и параметров проветривания при проведении подготовительных выработок» [94] рассматривается состояние вопроса текущего прогноза метановыделения и параметров проветривания при проведении подготовительных выработок. Показана методология текущего прогноза. Предлагаются методы решения отдельных задач аэрогазодинамики подготовительных выработок. Дается алгоритм текущего прогноза параметров проветривания выработки.

Публикация «Концепция проектирования системы вентиляции, обеспечивающей снижение риска взрывов метана и угольной пыли в

забоях тупиковых выработок» Е.А. Колесниченко, В.Б. Артемьева, И.Е. Колесниченко, Е.И. Любомищенко [81] посвящена скорректированной концепции системы вентиляции тупиковых выработок, с учетом того, что полное давление вентилятора рассчитывается для системы вентиляции, включающей в себя вентилятор, устройства регулирования, вентиляционные воздуховоды, забой выработки, призабойное пространство и остальную часть выработки до ее устья. Такой подход позволяет повысить надежность расчета параметров вентиляции, безопасность при работе проходческих комбайнов.

Работа «Регулирующее устройство для систем вентиляции горных тупиковых выработок» А.З. Тахо-Годи [133] посвящена современным способам и техническим средствам повышения эффективности проветривания тупиковых выработок, показаны основные недостатки этих способов, а также предложена новая конструкция регулирующего устройства, способного перераспределять дебит общешахтной вентиляции для проветривания подобных выработок.

В статье «Компьютерное моделирование процесса обработки сигналов в системе централизованного аэрогазового контроля» О.А. Кан, Б.Р. Жолмагамбетовой, С.Р. Жаксыбаевой, Ж.Б. Кадировой, А.Т. Жаркимбековой [74] рассматривается компьютерное моделирование процесса обработки сигналов в системе централизованного аэрогазового контроля с позиции теории массового обслуживания. Определены количественные характеристики работы системы массового обслуживания в стационарном режиме, рассмотрены условия обеспечения различных периодов опроса датчиков в системе. Передоложены алгоритмы оптимизации переменных периодов опроса датчиков, повышающие эффективность.

В статье Н.И. Алыменко, Д.Н. Алыменко, И.И. Трапезникова, А.В. Ковалева «Требования к современным осевым вентиляторам местного проветривания» [40] приведены основные недостатки венти-

ляторов местного проветривания. Сформулированы требования к конструкции современного шахтного осевого вентилятора, требования техники безопасности, а также требования к проектировщику и производителю.

Н.Н. Мохирев, В.В. Радько в своей статье «Экономические показатели при замене крупных вентиляторов на вентиляторы меньшего типоразмера» [103] доказывают, что замена крупных вентиляторов на вентиляторы меньшего типоразмера позволяет регулировать поступление воздуха в шахту, а также обосновывают экономическую эффективность такой замены.

В статье Ли Хи Ун, А.Н. Кнышенко, Ю.С. Лермонтова «К вопросу управления газовыделением средствами вентиляции» [94] рассматриваются различные методы управления газовыделением с помощью средств вентиляции при различных горно-геологических условиях и технологических процессах. Освещены недостатки и ограничения использования данных методов.

К.Х. Ли в своей статье «Текущий прогноз и оперативная корректировка параметров проветривания подготовительных выработок угольных шахт Кузбасса» [92] рассматривает методологию текущего прогноза параметров проветривания подготовительных выработок, а также методы оперативной корректировки параметров метановыделения и проветривания.

В.Н. Макаров, С.А. Волков, В.И. Фомин в статье «Генезис шахтного вентиляторостроения и перспективы его развития» [97] предлагают технические решения, которые учитывают специфику конструкции и условия эксплуатации шахтных центробежных вентиляторов, тем самым позволяя поднять на новый уровень аэродинамическую нагруженность и экономическую эффективность.

1.2.2 Моделирование гидро-газодинамических процессов в тупиковых выработках

Большой вклад в развитие гидро-газодинамика внесли ученые [] Г. Биркгоф, Дж. Бэтчелор, С.В. Валландер, М. Ван-Дайк, Г. Вилля, Г. Гельмгольц, Н.Е. Жуковский, Т. Карман, Г. Кирхгоф, Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе, М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат, Г. Ламб, Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Л.Г. Лойцянский, Л.М. Милн-Томсон, Л. Прандтль, А. Пуанкаре, Х. Рауз, Дж. Серрин, Н.А. Слезкин, П. Чжен и др. Все эти авторы выдающиеся физики, математики и философы. В их работах даны основные принципы и определения движения жидкости и газов, рассмотренные различные теоретические, практические, прикладные задачи.

Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях связано с решением уравнений движения газовой смеси, эти уравнения сложны и не линейны, зачастую не имеют аналитического решения. С недавнего времени развитие гидродинамики перешло на новый уровень, т.к. появились мощные вычислительные комплексы, в связи с чем, особый интерес проявляется к методу конечно элементного моделирования. Работы следующих авторов посвящены этим вопросам.

В работе «Аэродинамические модели с сосредоточенными параметрами лавы шахтной вентиляционной сети» В.В., О.Ю. Чередниковой [91] проведено исследование переходных процессов в коротких в аэродинамическом отношении воздухопроводах шахтной вентиляционной сети. Показано, что полная модель динамики воздушного потока коротких воздухопроводов при определенных условиях может быть сведена к уравнению первого порядка.

А.Н. Волобуев, А.П. Толстоногов в работе «Некоторые особенности гидродинамики потока жидкости в эластичном трубопроводе» [48] провели сравнительный анализ уравнения импульса для потока иде-

альной жидкости в жестком и эластичном трубопроводах. На отдельных примерах показано принципиальное различие этих уравнений. Проанализирована роль характера границы. Выявлена принципиальная возможность решения уравнений гидродинамики в эластичном трубопроводе, моделирующих бегущую волну. Исследовано влияние вязкости жидкости на импульсный режим течения.

Г.В. Русецкая в статье «Алгоритм интегрирования уравнений движения механической системы «Радиальный лопастной насос» [124] приведено описание алгоритма интегрирования уравнений движения механической системы «Радиальный лопастной насос», полученных на базе методов аналитической механики и представляющих собой математическую модель насоса. Разработанный алгоритм позволяет решать общие задачи динамики радиальных лопастных (центробежных) насосов, а также проводить анализ и оценку энергетической эффективности насоса.

В. Коньшин, А. Щеляев в статье «Применение программного комплекса FlowVision для математического анализа конструкции шахтного вентилятора» [84] произвели моделирования работы вентилятора местного проветривания ВМЭ-6, предназначенного для проветривания тупиковых горных выработок в угольных и рудных шахтах, включая опасные по метану и пыли. Целью работы является определение расходно-напорной характеристики вентилятора и оценка точности расчета в программном комплексе вычислительной гидродинамики FlowVision путем сравнения с экспериментом.

С.А. Козырев, П.В. Амосов в статье «Математическое моделирование проветривания тупиковых выработок при взрывных работах с использованием CFD-моделей» [80] представили результаты анализа расчетов на базе компьютерных моделей процесса выноса из выработки газообразных продуктов взрыва при нагнетательном способе про-

ветривания тупиковых выработок при вариации как расстояния от трубопровода до груди забоя, так и расхода подаваемого воздуха.

А.Г. Алымов, В.А.Бабин, Д.В. Дормидонтов в работе «Анализ течения в лопастной системе осевого вентилятора с применением CFD-расчетов» [41] провели CFD-расчеты осевого вентилятора, по результатам которых показали хорошее совпадение с экспериментальными энергетическими характеристиками. Средствами FlowVision выполнен анализ течения в проточной части вентилятора. По результатам проведенного анализа закрытие электродвигателя обечайкой позволяет снизить потери полного давления в отводящем диффузоре, по отношению к варианту с открытым электродвигателем.

В.И. Панферовым, А.А. Февралевым в статье «Численное моделирование переходных процессов в газопроводах» [112] разработана численная модель течения газа с дозвуковой скоростью по трубопроводам. Создан программный комплекс, позволяющий исследовать переходные процессы в газопроводах, обусловленные различными эксплуатационными ситуациями в системах газоснабжения, в частности, явление газодинамического удара.

В статье Н.М. Качурина, О.В. Коновалова, А.Н. Качурина «Математическое моделирование аэрогазодинамики тоннелей при проходке буровзрывным способом» [76] рассмотрены схемы вентиляции тоннелей в период их строительства и показано, что важнейшими характеристиками аэрогазодинамических процессов в тоннелях при их проведении являются параметры движения воздушного потока и диффузного переноса выделяющихся газовых примесей. Обоснованы базовые теоретические положения моделирования движения и диффузии газовых примесей в горных выработках. Получены уравнения для расчета продольного профиля скорости воздуха в тоннеле, динамики средней концентрации газовых примесей по длине тоннеля и в призабойной части.

В работе Б.А. Гриценко «Идентификация аэромеханических параметров шахтных вентиляционных трубопроводов на основе математического моделирования» [57] предложены два метода идентификации аэромеханических параметров вентиляционных трубопроводов: шахтный и лабораторный. Описывается необходимость математического моделирования в исследовании и решении задач вентиляции шахт. Предложены этапы решения задач.

В статье Ю.В. Круглова, Р.Р. Газизуллина «Использование CFD-методов при исследовании аэрогазодинамических процессов в рудничной аэрологии» [86] описан процесс оптимизации местных сопротивлений с целью уменьшения их аэродинамического сопротивления. Сделан вывод о том, что использование CFD-методов при проектировании вентиляционных систем позволяет более эффективно подобрать геометрические параметры важных узлов вентиляционной сети рудника и минимизировать энергопотребление главной вентиляторной установки, что является экономически эффективным.

Е.С. Каменецкий, А.В. Чупин в публикации «Модель вентиляции тупиковой выработки методом разделенных потоков» [73] рассмотрели трехмерную модель проветривания тупиковой выработки нагнетательным способом с распределением потоков воздуха, при котором одна часть потока свежего воздуха подается к груди забоя для вытеснения облака взрывных газов из зоны выброса, а другая подводится на границе этой зоны для создания воздушной завесы и разрежения выталкиваемого облака до безопасной концентрации. Проведенные расчеты поля скоростей воздуха позволяют определить локализацию застойных зон, в которых концентрация загрязняющих газов будет длительное время повышена и подбора оптимального режим проветривания выработки.

С.И. Харчук, А.В. Болдырев, С.М. Жижин в статье «Расчет напорной характеристики центробежного насоса численным методом»

[138] провели сравнение паспортных и расчетных напорных характеристик насоса, полученных на основе упрощенной теоретической методики и эксперимента в пакете гидродинамического моделирования Fluent 6.1. Представлены геометрия расчетной области, параметры сетки и решателя, физические модели и граничные условия, а также алгоритм построения напорной характеристики. Полученная в численном эксперименте характеристика качественно и количественно близка к действительной больше, чем теоретическая.

И. М. Васенин, Э. Р. Шрагер, А. Ю. Крайнов, Д. Ю. Палеев, О. Ю. Лукашов, В. Н. Костеренко в работе «Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты» [44] представили математическую модель для расчета нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты. Привели результаты расчетов процесса вентиляции тупиковой выработки вентилятором местного проветривания и нестационарных аэродинамических процессов при реверсировании вентилятора главного проветривания в модельной сети выработок шахты.

В статье Р.Р. Газизуллина, А.Г.Исаевича, Л.Ю. Левина «Численное моделирование процессов выноса вредных примесей рудничной атмосферы при проветривании тупиковых выработок различными способами» [54] представлены результаты численного моделирования аэродинамических процессов при различных способах проветривания тупиковых забоев, с учетом представления многофазности и многокомпонентности аэродинамической среды.

1.2.3 Автоматизированный электропривод ВМП

Автоматизированный электропривод и автоматизация вентиляторных установок общепромышленного назначения хорошо изучен, и представляется большим количеством публикаций, однако, что касается электропривода вентиляторов для шахт и рудников, то данный во-

прос изучен недостаточно, а наибольший объем публикаций посвящен мощным вентиляторам главного проветривания.

А.О. Жданов, В.А. Трефилов в статье «Характеристики асинхронных двигателей различного номинального напряжения мощностью 110 кВт электропривода вентилятора ВМЭ-12» [63] освещают рабочие характеристики асинхронных двигателей мощностью 110 кВт электропривода вентилятора ВМЭ-12, полученные в результате их электромагнитного расчета на номинальные напряжения 660, 1140, 6000 В. В работе также приведена математическая модель электротехнического комплекса «источник напряжения – кабельная линия – асинхронный двигатель», реализованная в среде Simulink, на которой исследовались переходные пусковые режимы двигателей. Сравнительный анализ рабочих характеристик и переходных пусковых режимов показал, что для вентилятора ВМЭ-12 лучшие показатели имеет двигатель с номинальным напряжением 6000 В.

В статье А.С. Карандаева, Г.П. Корнилова, О.И. Карандаевой, Ю.Н. Ротановой, В.В. Ровнейко, Р.Р. Галлямова «Анализ надежности оборудования тепловой электростанции при внедрении преобразователей частоты» [75] представлены характеристики электродвигателей механизмов собственных нужд теплоэлектроцентрали ОАО «ММК» и вариант их разбивки по категориям ответственности. Для комплексной оценки надежности предложен аппарат структурно-логического моделирования. Даны рекомендации по обеспечению надежности электроприводов механизмов собственных нужд при внедрении преобразователей частоты.

И.И. Эпштейн в своей статье «Выбор оптимального варианта электропривода для мощных механизмов с вентиляторной моментной характеристикой» [141] рассмотрел различные варианты регулируемых электроприводов переменного тока и их характеристики. Был сделан вывод, что применение регулируемых электроприводов мощных меха-

низмов с вентиляторной механической характеристикой является наиболее экономически выгодным. Приведен пример успешного внедрения и эксплуатации электроприводов Корпорации «ХЭЗ-Элетекс-С».

А.Р. Мухамадеев в научной статье «Преобразователи частоты и устройства плавного пуска для электроприводов переменного тока» [104] рассматривает общие принципы работы и применения преобразователей частоты и устройств плавного пуска и дает общие рекомендации по применению преобразователей частоты и устройств плавного пуска.

В работе «Мехатронные системы автоматического управления проветриванием горных выработок» [132] А.З. Тахо-Годи рассматривает возможность построения локальных систем управления вентиляцией тупиковых горных выработок как наиболее "трудных" объектов проветривания шахт опасных по газовому фактору на основе использования мехатронных систем управления и описывает синтез алгоритма функционирования локальной САУ вентиляцией местного проветривания.

В статье Л.Х. Дацковского, В.И. Рогового «Электропривод шахтных стационарных установок. Современное состояние и перспективы» [58] освещены вопросы разработки и промышленного внедрения следующих электроприводов: для шахтных подъемных машин, для центробежных вентиляторов главного проветривания и с тиристорными устройствами плавного пуска для осевых шахтных вентиляторов.

В статье В.В. Радченко, Н.В. Малеев, А.А. Мартынов, В.С. Захаров, В.А. Шевцов «Перспективы повышения уровня промышленной безопасности угольных шахт при использовании системы диспетчерского контроля (УТАС)» [123] подробно освещены характеристики системы диспетчерского контроля и ее преимущества и сделано заключение, что внедрение такой системы диспетчерского контроля на угольных шахтах позволит предотвратить развитие аварийных ситуаций.

Статья А.Г. Калинина, В.Н. Ларионова, А.В. Шепелина «Эффективность применения регулируемого электропривода вытяжных вентиляторов» [72] посвящена описанию метода оценки эффективности применения частотно регулируемого электропривода в вентиляторах, работающих под разрежением с асинхронным электроприводом с целью оценить эффективность их эксплуатации и разработать мероприятия по энергосбережению. В работе также описан опыт использования данного метода.

В статье Д.В. Самохина «Анализ возможностей снижения энергопотребления малогабаритных вентиляторов» [127] рассмотрена новая конструкция привода вентиляторов однофазных асинхронных двигателей в системах вентиляции воздуха, использование которой позволяет снизить энергопотребление на 25 %.

Е.И. Рушкин, А.С. Семёнов в своей научной статье «Исследование системы частотно-регулируемого электропривода вентилятора главного проветривания при помощи моделирования» [125] проводят исследование электропривода вентилятора главного проветривания рудника, в ходе которого выбран тип двигателя, принята система управления электроприводом и произведено моделирование режимов работы электродвигателя вентилятора с частотно-регулируемым электроприводом. Следует отметить, что по результатам моделирования использование частотного регулирования для синхронного двигателя вентиляторной установки главного проветривания рудника оказалось более предпочтительным.

В статье О.Б. Шонина, В.С. Пронько «Минимизация потерь в частотно-регулируемом приводе вентиляторов главного проветривания шахт» [137] рассматриваются энергосберегающие алгоритмы скалярного частотного управления асинхронным приводом вентилятора главного проветривания. На основе модели двигателя и модели системы частотного управления вентилятором получены зависимости потерь

энергии от потокосцепления для различных рабочих точек привода, позволившие сформулировать оптимальный закон управления. Рассмотрен энергосберегающий закон управления, основанный на градиентном алгоритме поиска минимума потерь и выполнено моделирование оптимального алгоритма пуска двигателя, позволяющего снизить потери энергии и повысить коэффициент мощности.

М.С. Баталов в статье «Система автоматического регулирования шахтного вентилятора с применением теории нечетких множеств» [42] рассмотрел проблемы организации эффективной шахтной вентиляции и описал преимущества и недостатки использования пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора и его модификации на основе методов нечеткой логики. Автором описана разработка и исследование модели системы автоматического регулирования ВМП с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором с блоком автонастройки на основе нечеткой логики.

В статье А.С. Плехова «Создание и использование потоков данных в управлении группой электроприводов насосов и вентиляторов» [115] предложена энергосберегающая многоуровневая комплексная система управления регулирующими электроприводами механизмов собственных нужд ТЭЦ для дополнительной выработки электроэнергии на электростанциях.

В.Г. Коломыцев, Д.А. Даденков, Л.В. Поносова, А.П. Честиков в работе «Идентификация параметров лабораторной системы водоснабжения для построения разомкнутой системы управления» [83] рассмотрели основные этапы идентификации объекта управления в лабораторной системе водоснабжения. В качестве объекта управления рассматривалась система трубопровода, являющаяся моделью реального технологического процесса в системах водоснабжения. Идентификация объекта управления выполнена на основе специального проекта в

SCADA-системе Trace Mode 6 и пакета имитационного моделирования MATLAB Simulink.

Значительный вклад в задачу разработки систем управления вентиляторами различного назначения внесла научная школа Института горного дела СО РАН (г. Новосибирск) под руководством Д.В. Зедгенизова.

Статья Д.В. Зедгенизова «Синтез алгоритма управления тоннельным вентилятором с поворотными на ходу лопатками рабочего колеса» [67] посвящена разработке математического описания тоннельного вентилятора с ПЛРК-вентиляционной сетью, а также алгоритмов автоматического управления для повышения эффективности тоннельного проветривания. В ней закон управления электромеханическим исполнительным механизмом поворота лопаток рабочего колеса тоннельного вентилятора синтезирован по методу скользящих режимов.

В статье «Система автоматического управления частотным электроприводом тоннельного вентилятора метрополитена» Д.В. Зедгенизовым [68] разработана математическая модель объекта «станционный вентилятор с регулируемой частотой вращения – участок вентиляционной сети метрополитена», необходимая для проведения синтеза алгоритмов управления воздухораспределением в вентиляционной сети линии метрополитена. С применением частотного метода выполнен синтез алгоритмов управления производительностью станционного вентилятора. Численным экспериментом подтверждена адекватность предложенной математической модели системы автоматического управления станционным вентилятором с регулируемой частотой вращения.

В статье «Основные принципы автоматического управления вентиляцией линии метрополитена» [66] Д.В. Зедгенизовым приведены критерии оптимального управления проветриванием линии метрополитена мелкого заложения, особенности вентиляционной системы.

В работе «Управление синхронным электроприводом главного вентилятора при автоматизации проветривания шахт» [70] Д.В. Зедгенизов рассмотрел регулирование осевых вентиляторов главного проветривания при автоматизации проветривания шахт на ходу поворотом лопаток с приводным синхронным двигателем и обосновал, что это позволит снизить электропотребление на вентиляцию за счет снижения расхода воздуха в среднем на 30 %, получить дополнительную экономию электроэнергии за счет снижения потерь в узле нагрузки в среднем на 7 %, а также улучшить качество электроснабжения потребителей. Кроме того, внедрение предлагаемой системы управления проветриванием позволит существенно улучшить воздухораспределение в шахте, значительно повысит безопасность горных работ и снизит себестоимость добываемого полезного ископаемого

Д.В. Зедгенизов, В.В. Фурса в работе «Обзор состояния проблемы шахтных подземных регуляторов расхода воздуха» [65] провели анализ различных типов шахтных вентиляционных установок и обобщили требования к ним как к объектам автоматического управления. В статье приведено математическое описание одного из наиболее эффективных шахтных линейных регуляторов расхода воздуха шибберного типа.

В работе «Исследование двухканальной системы автоматического управления расходом воздуха в тоннеле метрополитена» [64] Д.В. Зедгенизовым представлено математическое описание системы управления расходом воздуха, поступающим на платформу станции метрополитена, которая состоит из двух каналов управления: канала регулирования производительности стационарного вентилятора и канала управления расходом воздуха в тоннеле, непосредственно примыкающем к платформе. Приводятся результаты численного эксперимента по проверке адекватности предложенной модели.

1.2.4 Краткие выводы по обзору научных публикаций

Анализ научных публикаций показал, что проблемы проветривания тупиковых выработок изучаются уже давно и большим количеством ученых. В настоящее время работы ведутся в направлении изучения газодинамических процессов происходящих в выработке при различных критических ситуациях (внезапные выбросы газа, угля, взрывы). Способы изучения этих процессов сейчас базируются на методах численного моделирования и экспериментов на физических моделях. В виду увеличения производительности вычислительной техники, наибольшее распространение получают метод конечноэлементного моделирования, так называемые CFD-, CFX- методы, которые позволяют с большой точностью отобразить динамику переходных процессов. Также намечен интерес к оптимизации вентиляционного оборудования: разработка и внедрение улучшенных систем регулирования вентиляционных потоков, а также модернизация вентиляторов, с целью увеличения производительности.

1.3 Технические средства

На рынке горно-шахтного оборудования (ГШО) представлен ряд систем аэрогазового контроля (АГК), обеспечивающих соблюдение требований безопасности работы систем вентиляции угольных шахт, предусмотренных ПБ [21]. Поскольку данные системы выполняют единые требования, они в значительной мере схожи между собой по предлагаемому функционалу. Структурные схемы систем АГК производства НПФ «Гранч»[119] и структурная схема системы газоаналитической шахтной многофункциональной «МИКОН III»[120] производства ООО «ИНГОРТЕХ» представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

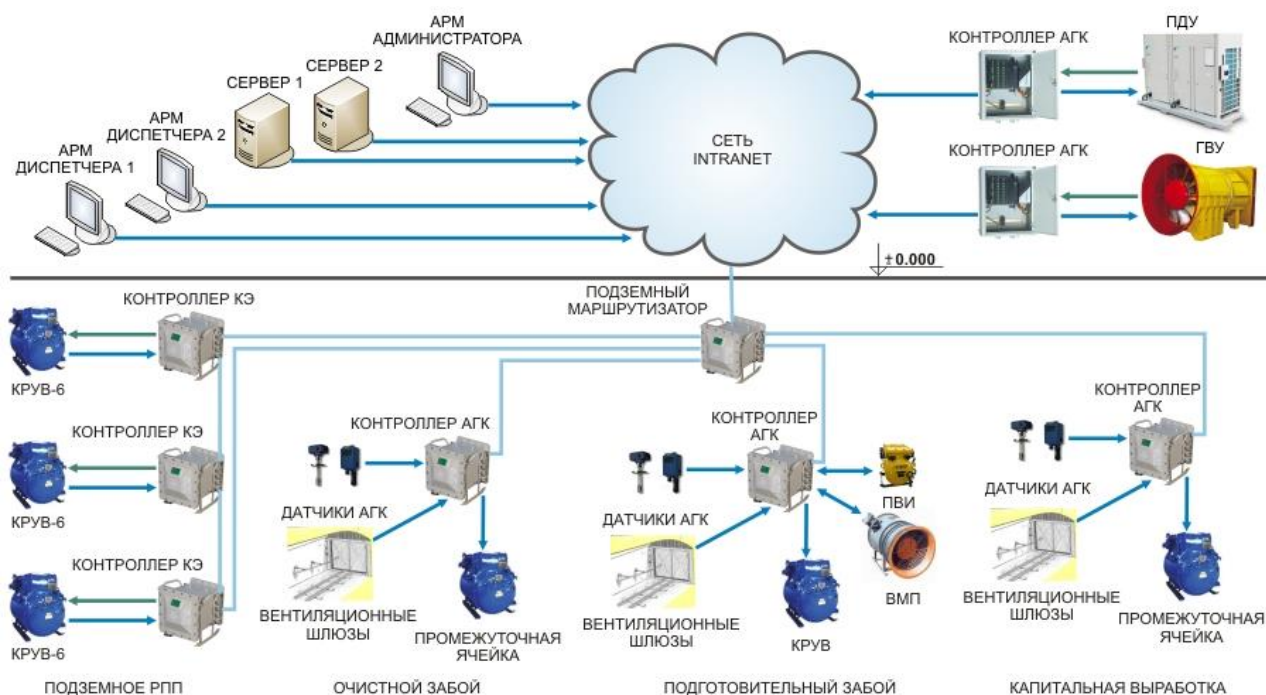


Рисунок 1. Структурная схема системы АГК НПФ «ГРАНЧ»

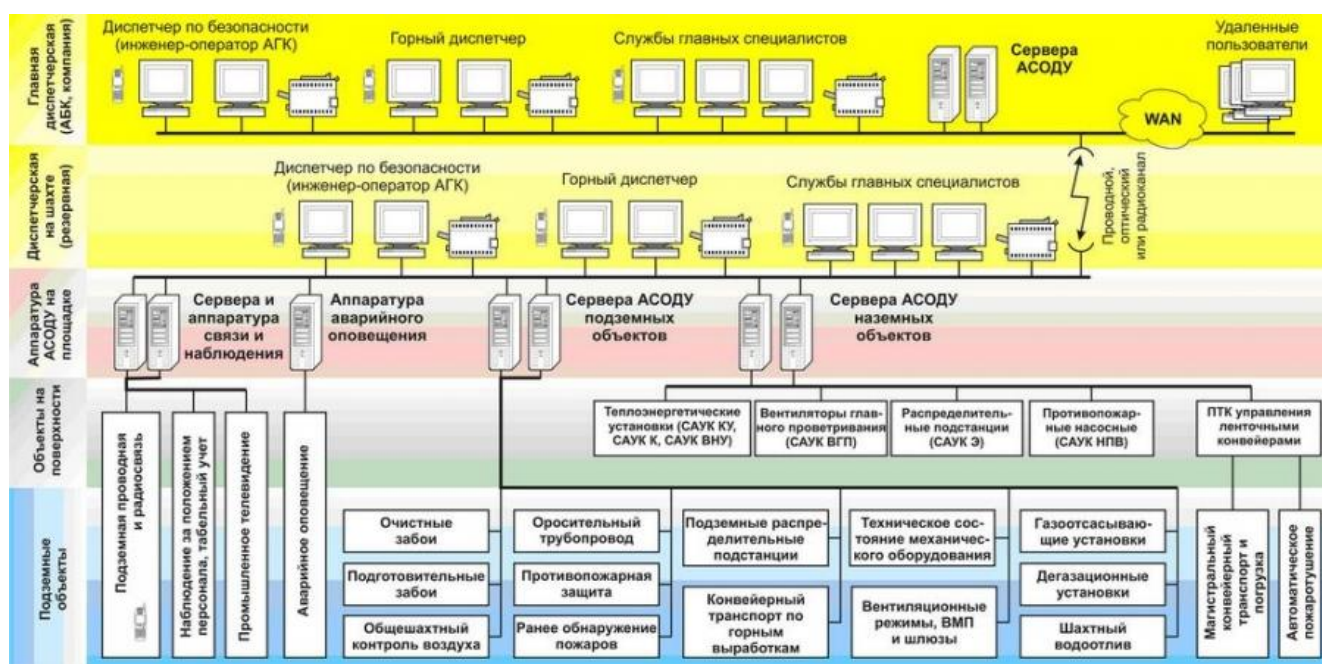


Рисунок 2. Структурная схема системы газоаналитической шахтной многофункциональной «МИКОН III» ООО «ИНГОРТЕХ»

Для примера рассмотрим систему АГК производства НПФ «Гранч», в которой выполняются следующие функции:

- аэрогазовый контроль в местах установки датчиков в горных выработках шахты;
- автоматическая газовая защита;
- автоматический контроль и управление работой главных вентиляторных установок;
- автоматический контроль и управление работой ВМП подготовительных забоев;
- автоматический контроль положения дверей вентиляционных шлюзов, устроенных в горных выработках для обеспечения режима проветривания;
- телесигнализация и телеизмерение параметров (концентрация метана, концентрация оксида углерода, скорость воздушного потока в очистном забое и вентиляционных трубопроводах подготовительных забоев) рудничной атмосферы;
- телеуправление оборудованием поддержания безопасного аэрогазового режима в горных выработках.

Система обеспечивает:

- передачу непрерывной информации о значениях контролируемых параметров на автоматизированном рабочем месте (АРМ) инженера-оператора АГК и горного диспетчера и ее регистрацию;
- дистанционную звуковую и световую аварийную сигнализацию о превышении нормы любого из контролируемых параметров на АРМ инженера-оператора АГК и горного диспетчера;
- автоматическую выдачу команд на снятие напряжения с электрооборудования контролируемого объекта при достижении предельно допустимых значений одного из контролируемых параметров;
- дистанционное отключение и включение горным диспетчером электроснабжения объектов;

- осуществление оперативного изменения конфигурации системы и размещения оборудования в соответствии с изменением горнотехнических и горно-геологических условий в шахте с соответствующим изменением алгоритма функционирования с целью добавления реакции на вновь вводимые датчики или исключением реакции на выводимые из состава системы;

- самоконтроль основных элементов схемы, а также защиту от замыкания и обрыва цепи, соединяющей устройство с датчиком;

- хранение информации в памяти компьютера в течение года.

На рисунке 3 приведен общий вид системы контроля шахтной атмосферы МСКА производства ООО «Горный-ЦОТ» [122], предназначенной для контроля атмосферы рабочей зоны шахты, атмосферы в заперемычной зоне отработанных пространств и параметров дегазационных трубопроводов. Технические характеристики системы представлены в таблице 3.

Функции выполняемые системой:

- отображение измеренных и расчетных параметров на цветном графическом дисплее, вывод статистики в виде графиков и диаграмм;
- расчет расхода метана в дегазационном трубопроводе;
- световая и звуковая сигнализация при превышении ПДК;
- преобразование измеренных и рассчитанных параметров в цифровые сигналы для передачи через цифровой порт по проводному каналу (RS-485 Modbus RTU);
- запись и последующее отображение экстремальных значений концентраций за период после включения;
- функция «черного ящика» - запись результатов измерений в энергонезависимую память.



Многофункциональная система
контроля шахтной атмосферы

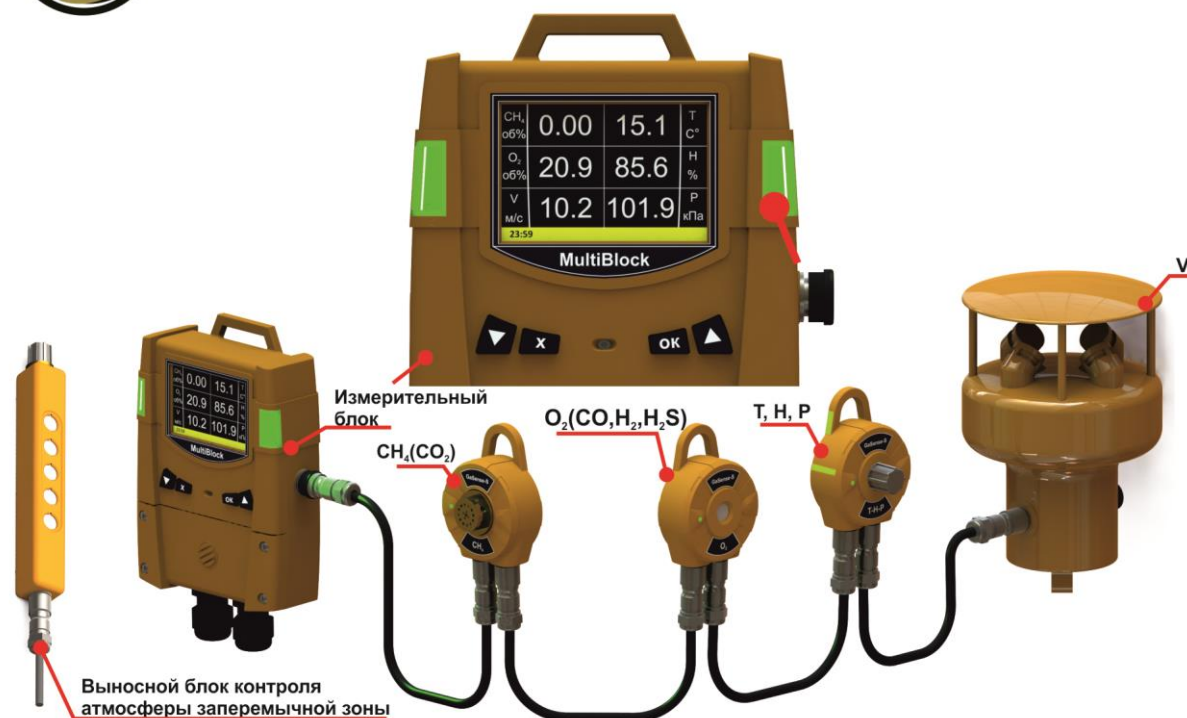


Рисунок 3. Общий вид системы контроля шахтной атмосферы МСКА
производства ООО «Горный-ЦОТ»

Таблица 3. Технические характеристики МСКА

Параметр, единицы измерения	Значение
Диапазон температуры окружающей среды, °C	от -20 до +50
Диапазон атмосферного давления, кПа	от 84 до 106.7
Диапазон относительной влажности, % (при +25°C)	от 25 до 95
Маркировка взрывозащиты	Ex ia I Ma
Защита от пыли и влаги	IP 54
Интервал времени работы без корректировки показаний по измерительному каналу метана, мес.	12
Межповерочный интервал, мес	12
Срок службы, не менее, лет	5

Параметр, единицы измерения	Значение
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	115x70x35
Диапазон измерений объемной доли метана (CH ₄), объемная доля, %	от 0 до 2,5
Диапазон показаний объемной доли метана (CH ₄), объемная доля, %	от 0 до 100
Диапазон измерений объемной доли оксида углерода (CO), объемная доля, млн ⁻¹	от 0 до 100/от 0 до 500 (CO/ H ₂ S)
Диапазон измерений объемной доли сероводорода (H ₂ S), объемная доля, млн ⁻¹	от 0 до 200
Диапазон измерений объемной доли диоксида углерода (CO ₂), объемная доля, %	от 0 до 1
Диапазон показаний объемной доли диоксида углерода (CO ₂), объемная доля, %	от 0 до 3
Диапазон измерений объемной доли кислорода (O ₂), объемная доля, %	от 0 до 25
Диапазон индикации скорости воздушного потока, м/с	0,01 – 0,1
Диапазон показаний абсолютного давления, кПа	от 84 до 106,7
Диапазон измерений относительной влажности, %	от 0 до 100
Диапазон измерений дифференциального давления, мм. вод. ст. (кПа)	от 0 до 500 (от 0 до 4,9)
Пределы основной допускаемой погрешности измерения по каналу объемной доли оксида углерода (CO)	±5 млн ⁻¹ или ± 10 % от показаний, что больше млн ⁻¹
Пределы основной допускаемой погрешности измерения по каналу объемной доли сероводорода (H ₂ S)	±5 млн ⁻¹ или ± 10 % от показаний, что больше млн ⁻¹

Параметр, единицы измерения	Значение
рода (H_2S)	млн ⁻¹
Пределы основной допускаемой погрешности измерения по каналу объемной доли диоксида углерода (CO_2)	$\pm 0,1$ об. или $\pm 10\%$ от показаний, что больше
Пределы основной допускаемой абсолютной погрешности измерения по каналу объемной доли кислорода (O_2), объемная доля, %	$\pm 0,5$
Диапазон измерения скорости воздушного потока, м/с	0,1 – 30
Погрешности измерения скорости воздушного потока, м/с, не более	$\pm(0,05+0,05V)$, где V - измеренная скорость потока

Анализируя приведенный функционал и обобщая его на системы АГК в целом можно заключить, что любая система АГК должна быть интегрирована в систему диспетчерского управления шахтой, обладать интерфейсами связи для постоянной передачи данных о состоянии рудничной атмосферы диспетчеру. При этом система АГК может предусматривать управление вентиляторами местного проветривания, но только по принципу включения-отключения, не учитывая возможность применения преобразователей частоты.

Вероятной причиной данного обстоятельства является естественная инерционность внедрения новых видов оборудования для использования в шахте, поскольку возможность внедрения юридически появилась в 2011 г., а также тот факт, что не смотря на обилие преобразователей частоты для вентиляторов общепромышленного назначения, анализ рынка ГШО выявил всего несколько отечественных производителей преобразователей частоты во взрывозащищенном исполнении.

Например, производитель горношахтного оборудования ООО «Электромашина» (г. Кемерово) предлагает устройство ЧПВП – частотный преобразователь вентилятора проветривания [121]. Общий вид преобразователя частоты представлен на рисунке 4, а технические характеристики ЧПВП приведены в таблице 4. Данный преобразователь частоты оснащен программируемым логическим контроллером (ПЛК) и линиями связи для дистанционного управления, предназначен для автоматического поддержания заданной производительности вентиляторов местного проветривания.



Рисунок 4. Внешний вид преобразователя частоты ЧПВП производства ООО «Электромашина»

ЧПВП обеспечивает:

- возможность подключения двух двигателей к одному преобразователю;
- возможность выбора режима работы привода: рабочий или резервный;

- возможность подключения к существующим системам аппаратуры контроля поступления воздуха в тупиковые выработки;
- возможность подключения к магистральной линии оптической связи;
- возможность подключения к полевой шине по интерфейсу RS-485;
- искробезопасность цепей управления, питания внешних датчиков и диспетчеризации, в том числе оптоволоконной линии связи.

ЧПВП осуществляет:

- защиту двух отходящих линий от коротких замыканий и перегрузки электродвигателей;
- предварительный контроль изоляции отходящих линий (режим блока реле утечки);
- защиту от потери управляемости;
- контроль целостности заземляющей жилы и жил дистанционного управления;
- защиту от перегрева электродвигателя;
- контроль утечки воздуха из вентиляционной трубы;
- контроль виброускорений электродвигателя ВМП;
- защиту от заклинивания вала ВМП.

Таблица 4. Технические характеристики ЧПВП

Параметр	Значение
Количество фаз питающей сети	3
Номинальное напряжение питающей сети, В	690
Частота питающей сети, Гц	50
Количество подключаемых ВМП, шт.	1 или 2
Суммарная мощность эл. двигателей ВМП, кВт	50 / 75 / 90
Способ подключения кабелей силовых	БРС вводы
Количество портов: Slave / Master	RS-485: 1 / 1

Параметр	Значение
Оптоволоконная связь	Одномодовая (SC)
Протокол обмена данными (полевая линия связи)	Modbus RTU
Охлаждение	Воздушное
Габаритные размеры (ширина x высота x глубина), мм	1120×1385×1000
Масса, не более, кг	850
Маркировка взрывозащиты	PBEx d [ia op is]I
Степень защиты от внешних воздействий	IP54
Рабочая температура окружающей среды, °C	-10...+45

Также на рынке имеется преобразователь частоты БЧРВ–30 производства НПО «Аэросфера», имеющий схожие с ЧПВП технические характеристики и особенности.

Таким образом, технических средств, представленных на рынке ГШО, в полной мере достаточно для организации системы автоматического регулирования производительности ВМП путем изменения частоты вращения его рабочего колеса [143, 145]. Предлагаемая система управления электроприводом вентилятора местного проветривания с целью поддержания нормальных условий атмосферы в выработке концептуально является интеграцией существующих технических решений, а ее структура показана на рисунке 5. Для реализации данной системы необходимо следующее оборудование:

1. Система контроля параметров рудничной атмосферы.
2. Преобразователь частоты.
3. Программируемый логический контроллер.

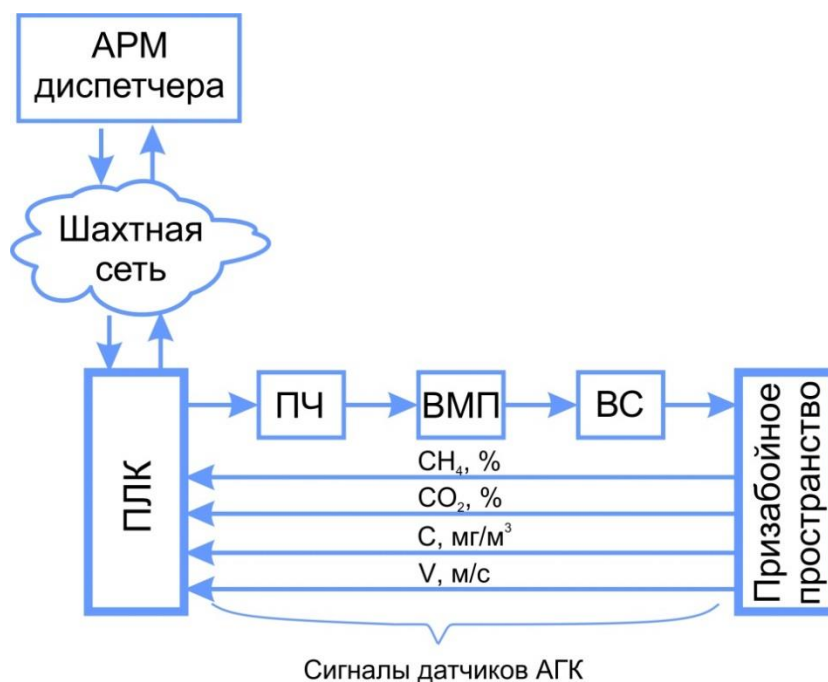


Рисунок 5. Общая структурная схема предлагаемой системы автоматического управления ВМП

Анализ технических средств, необходимых для реализации предлагаемой системы автоматического управления ВМП, показал, что дополнительно технические разработки не требуются, имеющиеся на рынке ГШО системы контроля рудничной атмосферы, преобразователи частоты и измерительные средства подходят для поставленных задач. Для успешной реализации предложенной системы управления ВМП необходимо разработать алгоритмическое обеспечение.

1.4 Результаты анализа и постановка задач

В ходе подготовки рассмотренного материала решены следующие задачи:

- анализ нормативно-технической документации и научных информационных источников в области проветривания подготовительных (тупиковых) выработок;
- анализ и классификация существующих схмотехнических решений автоматизированного электропривода вентиляторов местного проветривания.

Анализ нормативно-технической документации позволил сформулировать требования к системам местной вентиляции, а также выявил основные недостатки рассматриваемого нормативного поля:

1. Наличие большого количества регулирующих нормативных документов, не редко дублирующих друг друга.
2. Большая инерционность нормативно-технической документации, чьи требования, за частую, отстают от современных средств и методов ведения работ.

В то же время установлено, что с 2011 г. снят косвенный запрет на применение частотно-регулируемого электропривода ВМП как такового, предусмотренная в ПБ возможность применения частотного регулирования электроприводов ВМП для плавного заполнения воздухопроводов создает предпосылку для разработки системы управления для автоматизированного частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания угольных шахт, удовлетворяющей критериям безопасности и энергетической эффективности.

Анализ научных исследований показал, что в настоящее время работы в сфере математического описания процессов, протекающих в системах местной вентиляции, ведутся в сторону уточнения процесса перемещения пылегазового потока в горных выработках с учетом особенностей микроклимата и различных воздействий со стороны источников вредных и опасных примесей (внезапные выбросы метана, угля, взрывы). Также работы ведутся по совершенствованию оборудования, улучшению его эксплуатационных характеристик, повышению надежности. Все большее внимание при исследованиях получает компьютерное моделирование, и в частности, методы конечноэлементного моделирования.

Автоматизация систем проветривания тупиковых выработок, энергосберегающие технологии и улучшение условий труда в подготовительных выработках, исходя из анализа публикаций и информацион-

ных источников, не имеет массового глубокого интереса в научном сообществе.

Анализ технических средств показал наличие на рынке горно-шахтного оборудования систем аэрогазового контроля различных производителей, как отечественных, так и зарубежных. Все системы оборудованы современными линиями связи и свободно интегрируются в системы диспетчерского управления шахты, в соответствии с требованиями ПБ. Также на рынке ГШО имеются преобразователи частоты во взрывозащищенном исполнении, предназначенные для плавного заполнения воздухопроводов и поддержания заданной производительности, однако такого регулирования не предусмотрено в ПБ. Технически имеется возможность осуществления полной интеграции системы автоматического управления ВМП с системой АГК.

Таким образом, вопрос комплексного подхода к системе автоматизированного управления вентилятором местного проветривания является актуальной задачей, имеющей значение для угольной отрасли.

В дальнейшей работе для решения поставлены следующие задачи:

- разработка математической модели электропривода ВМП с учетом переходных процессов в вентиляционной сети и призабойном пространстве;
- разработка концепции системы управления электроприводом ВМП, обеспечивающей регулирование состава рудничной атмосферы тупиковой выработки;
- разработка оригинальных методов и алгоритмов управления частотно-регулируемого электропривода вентиляторов местного проветривания;
- создание программных средств, реализующих полученное математическое описание, и проведение вычислительных экспериментов, дающих оценку энергетической эффективности и безопасности полученных в работе решений;

- проведение экспериментальных исследований на физической модели, имитирующей тупиковую выработку;
- оценка полученных результатов с точки зрения нормативной документации, регламентирующей безопасность работы угольных шахт, и разработка рекомендаций по применению частотно-регулируемого электропривода для систем местного проветривания.

2 ПРЕДЛАГАЕМАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Концепция системы управления

Из возможных способов проветривания тупиковых выработок в работе рассматривается нагнетательный способ, т.к. он является единственно допустимым на шахтах опасных по газу и пыли с применением ВМП с электрическим двигателем. Схематически этот способ показан на рисунке 6.

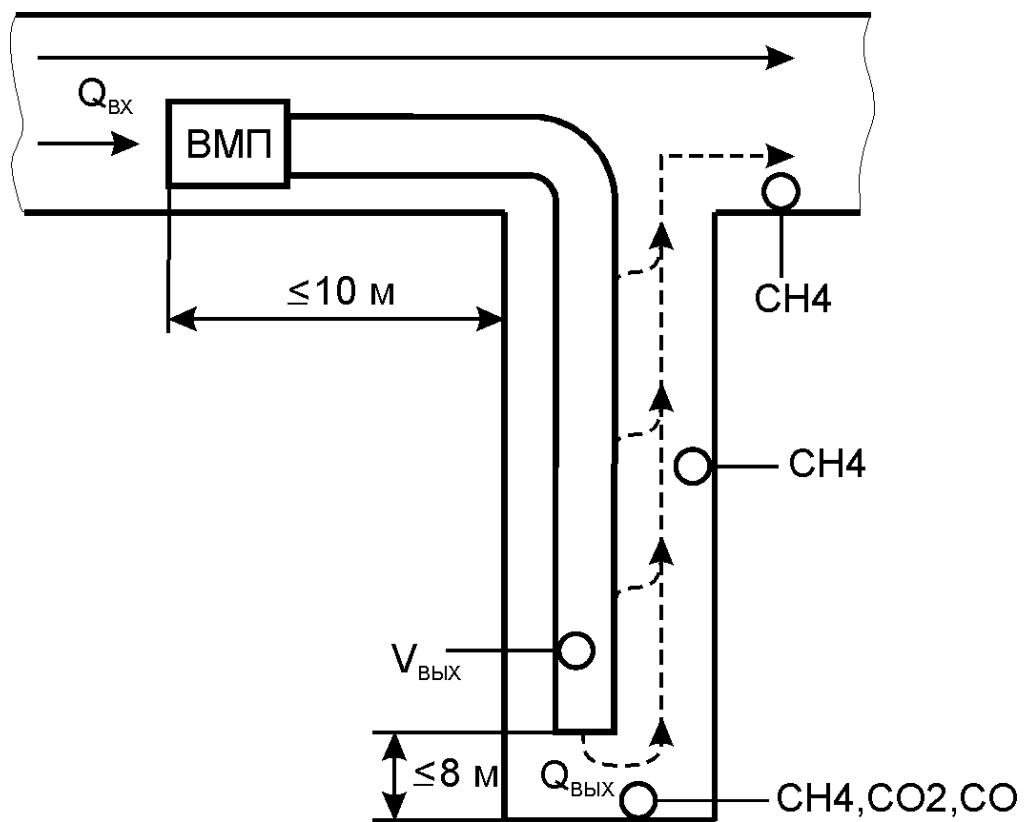


Рисунок 6. Схема нагнетательного способа проветривание тупиковой выработки

При рассматриваемом способе проветривания нормальный состав рудничной атмосферы поддерживается вентилятором местного проветривания, установленным в сквозной воздухоподающей выработке, проветриваемой за счёт общешахтной депрессии, нагнетаемый им воздух по вентиляционным трубам поступает в призабойное пространство

тупиковой выработки. Исходящая струя проходит по всей выработке, поэтому вентиляция должна обеспечивать снижение концентрации вредных газов до допустимой нормы в любой точке выработки.

Согласно нормам ПБ для контроля качества рудничной атмосферы в воздуховоде, непосредственно в призабойном пространстве и на исходящей струе тупиковой выработки устанавливаются датчики системы АГК, контролирующие содержание вредных примесей, в частности анемометр для контроля скорости воздушного потока на выходе вентиляционной сети $V_{\text{ВЫХ}}$ и газоанализаторы, определяющие содержания углекислого газа CO_2 , угарного газа CO и метана CH_4 . Нормальная работа горной выработки будет обеспечена, если ВМП не будет допускать превышения концентраций вредных примесей более чем указано в таблице 1.

Для решения поставленной задачи разработан вариант системы автоматического управления (САУ), общая структура которой показана на рисунке 7, где БР – блок регуляторов; ПЧ – преобразователь частоты; ВС – вентиляционная сеть [144].

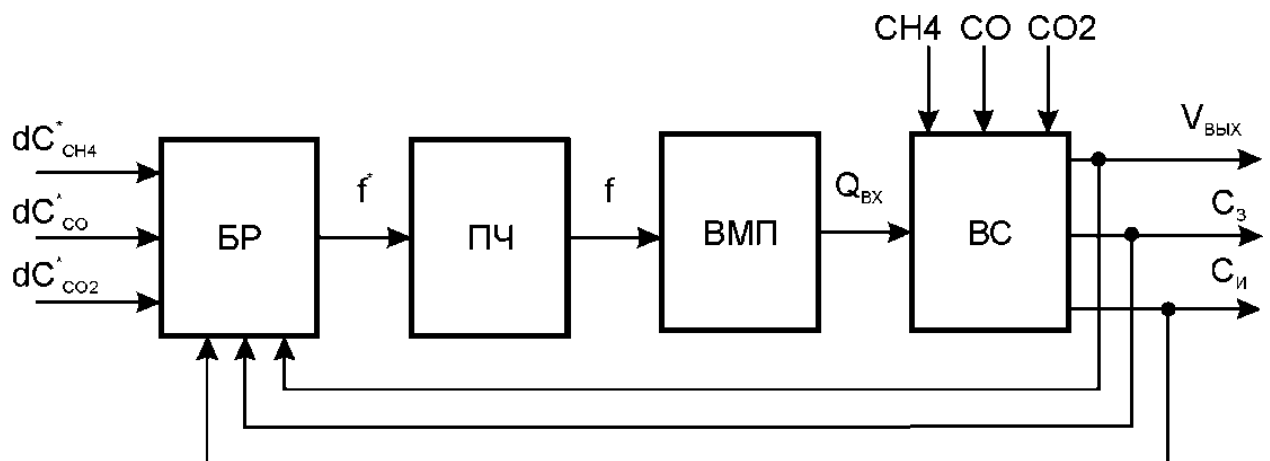


Рисунок 7. Структура САУ ВМП

Структура САУ иерархическая. Во внутреннем контуре за счет изменения потока воздуха $Q_{\text{ВХ}}$ на входе ВМП посредством регулирования частоты f подводимого к двигателю напряжения по заданию f^*

для ПЧ поток $Q_{\text{ВЫХ}}$ поддерживается на заданном уровне $Q_{\text{ВЫХ}}^*$. Величина $Q_{\text{ВЫХ}}$ определяется косвенно по скорости выходного потока $V_{\text{ВЫХ}}$, регулирование осуществляется по отклонению с применением ПИД-регулятора.

Внешний контур регулирования организован по принципу нахождения минимально достаточного задания потока $Q_{\text{ВЫХ}}^*$ для разбавления вредных примесей, где в качестве задающих воздействий используются допустимые диапазоны концентраций вредных газов $dC_{\text{CH}_4}^*$, dC_{CO}^* и $dC_{\text{CO}_2}^*$, а обратные связи организованы по показаниям газоанализаторов в забое C_3 (концентрация CH_4 , CO и CO_2) и на исходящей струе $C_{\text{И}}$ (концентрация CH_4). Структура внешнего контура регулирования показана на рисунке 8.

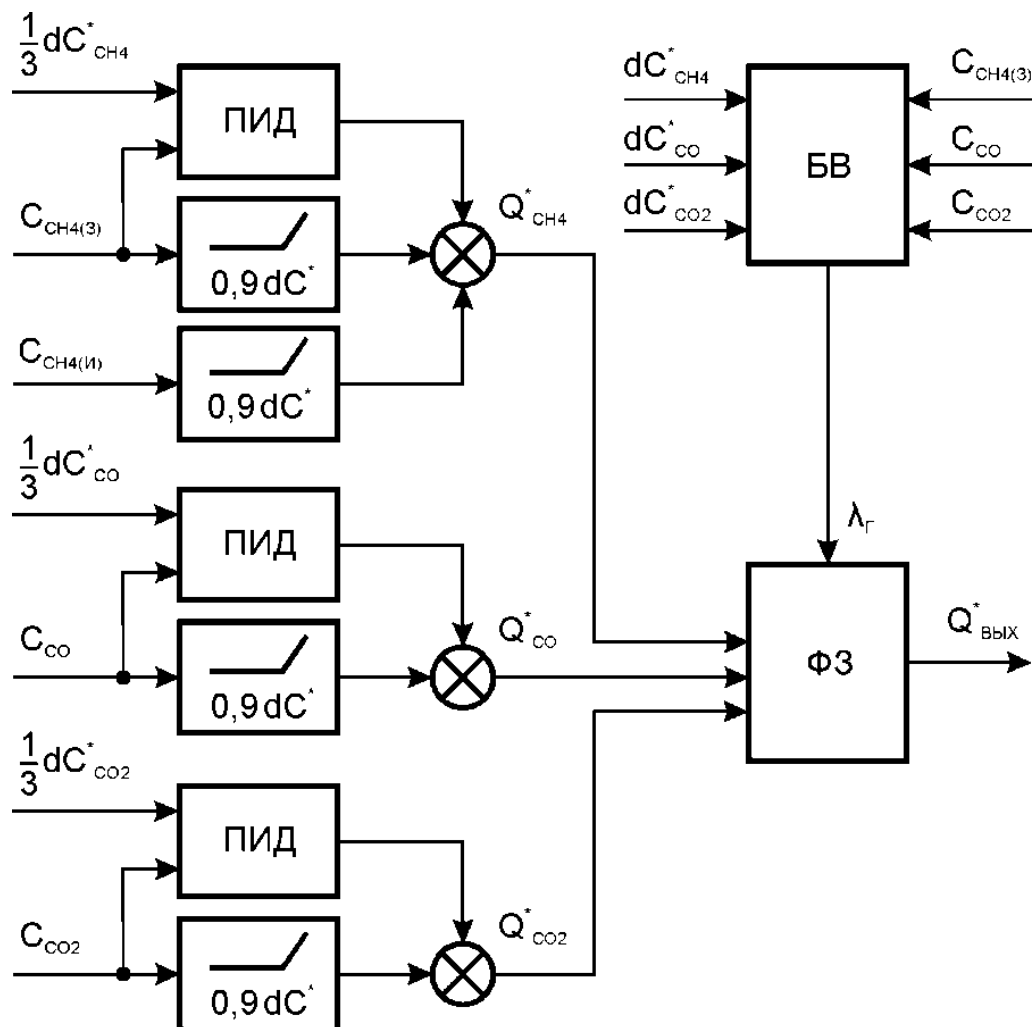


Рисунок 8. Структура внешнего контура регулирования

Для каждого газа (CH_4 , CO и CO_2) определяется заданная концентрация, из соображений безопасности равная одной трети от допустимого диапазона, отклонение от которой регулируется ПИД-регулятором. Учитывая возможность внезапного непрогнозируемого повышения концентрации, в дополнение к выходному сигналу ПИД-регулятора при превышении концентрацией порогового значения в 90 % от допустимого диапазона формируется сигнал усиления. Эти сигналы совместно образуют задание для потока воздуха на выходе ВС, требуемое для разбавления конкретного газа ($Q_{\text{CH}_4}^*$, Q_{CO}^* и $Q_{\text{CO}_2}^*$).

Величины Q_{Γ}^* , где Γ – индекс, обозначающий тип газа: CH_4 , CO_2 или CO , будут отличаться и, поскольку концентрация каждого из газов должна лежать в пределах диапазона dC_{Γ}^* , задача управления приобретает многокритериальный характер. Для ее решения предлагается применить метода взвешивания, где весовой коэффициент каждого задания потока воздуха определяется в блоке взвешивания (БВ) по степени близости концентрации газа к границе допустимого диапазона:

$$\lambda_{\Gamma} = \left(1 - \frac{dC_{\Gamma}^* - C_{\Gamma}}{dC_{\Gamma}^*} \right). \quad (1)$$

Итоговое значение $Q_{\text{ВЫХ}}^*$ определяется формирователем задания (ФЗ) по среднегеометрическому принципу:

$$Q_{\text{ВЫХ}}^* = \frac{Q_{\text{CH}_4}^* \cdot \lambda_{\text{CH}_4} + Q_{\text{CO}}^* \cdot \lambda_{\text{CO}} + Q_{\text{CO}_2}^* \cdot \lambda_{\text{CO}_2}}{\lambda_{\text{CH}_4} + \lambda_{\text{CO}} + \lambda_{\text{CO}_2}}. \quad (2)$$

Таким образом, чем ближе текущая концентрация газа к границе диапазона, тем больший она вносит вклад в $Q_{\text{ВЫХ}}^*$. При этом соблюдаются как нормы безопасности, так и энергетической эффективности, постольку при снижении газовыделения подача ВМП также снизится.

2.2 Математическое описание

2.2.1 Математическая модель системы вентиляции

В работе рассматривается система вентиляции тупиковой выработки, структура которой представлена на рисунке 9. Система включает в себя преобразователь частоты, питающий асинхронный электродвигатель (АД) привода ВМП, при работе которого ВМП создает воздушный поток, поступающий в вентиляционную сеть.

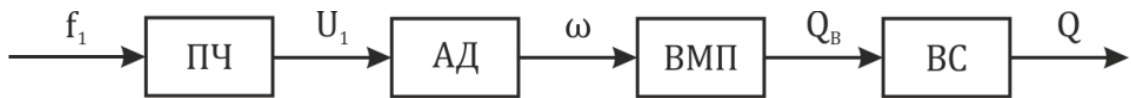


Рисунок 9. Структура системы вентиляции тупиковой выработки

В модель системы ПЧ-АД включена силовая и управляющая части ПЧ, причем для силовой части приняты допущения, что силовые ключи являются идеализированными, а их коммутация производится по принципу независимой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Управляющая часть включает в себя задатчик интенсивности, а также программируемое соотношение заданных частоты и амплитуды напряжения, реализуемых силовой частью ПЧ, т.е. произвольный закон частотного управления.

$$\begin{aligned}
 U_a &= U_d \cdot \text{sign}(U_a^* - U_{on,n}); \\
 U_b &= U_d \cdot \text{sign}(U_b^* - U_{on,n}); \\
 U_a^* &= U^* \cdot \cos \int \omega_0 dt; \\
 U_b^* &= U^* \cdot \sin \int \omega_0 dt; \\
 U^* &= f(f^*),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где U_a , U_b составляющие по осям неподвижной системы координат (α , β) вектора подводимого к статору напряжения, В соответственно; U_d – величина напряжения на нагрузке, В; $U_{on,n}$ – величина опорного пило-

образного напряжения, В; U^* - заданное значение напряжения, В; U_a^* , U_b^* - действующие значения напряжения, В; f^* - заданная частота питающей сети, Гц; ω_0 - синхронная частота вращения электродвигателя, рад/с.

Математическое описание преобразователя частоты в работе представлено в среде MatLab\Simulink и приведено в приложении 3.

Математическая модель АД, выражена через потокосцепления двигателя в неподвижной системе координат α - β [62]. В этой математической модели принимаем вектор переменных состояния:

$$\mathbf{x} = [\psi_{1\alpha} \psi_{1\beta} \psi_{2\alpha} \psi_{2\beta} \omega]^T, \quad (4)$$

где $\psi_{1\alpha}$, $\psi_{1\beta}$, $\psi_{2\alpha}$, $\psi_{2\beta}$ - составляющие векторов потокосцеплений статора и ротора соответственно; ω - угловая скорость вала двигателя, а вектор управляющих воздействий:

$$\mathbf{u} = [u_{1\alpha} u_{1\beta}]^T, \quad (5)$$

где $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ - составляющие по осям неподвижной системы координат (α, β) вектора подводимого к статору напряжения.

Модель получена с использованием уравнений магнитной связи:

$$\begin{aligned} i_{1\alpha} &= L_2 \sigma \psi_{1\alpha} - L_{12} \sigma \psi_{2\alpha}; \\ i_{1\beta} &= L_2 \sigma \psi_{1\beta} - L_{12} \sigma \psi_{2\beta}; \\ i_{2\alpha} &= L_1 \sigma \psi_{2\alpha} - L_{12} \sigma \psi_{1\alpha}; \\ i_{2\beta} &= L_1 \sigma \psi_{2\beta} - L_{12} \sigma \psi_{1\beta}, \end{aligned} \quad (6)$$

где L_1, L_2 - индуктивности обмоток статора и ротора соответственно; L_{12} - взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; коэффициент рассеяния, определяется как:

$$\sigma = \frac{1}{L_1 L_2 - L_{12}^2}, \quad (7)$$

а также зависимости, описывающей формирование электромагнитного момента:

$$M = \sigma L_{12} p (\psi_{1\beta} \psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha} \psi_{2\beta}), \quad (8)$$

где p - число пар полюсов.

Данная модель записывается следующим образом:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \begin{bmatrix} u_{1\alpha} - \sigma R_1 L_2 \psi_{1\alpha} + \sigma R_1 L_{12} \psi_{2\alpha} \\ u_{1\beta} - \sigma R_1 L_2 \psi_{1\beta} + \sigma R_1 L_{12} \psi_{2\beta} \\ -\sigma R_2 L_1 \psi_{2\alpha} + \sigma R_2 L_{12} \psi_{1\alpha} - p\omega \psi_{2\beta} \\ -\sigma R_2 L_1 \psi_{2\beta} + \sigma R_2 L_{12} \psi_{1\beta} + p\omega \psi_{2\alpha} \\ p\sigma L_{12} \psi_{1\beta} \psi_{2\alpha} / J - p\sigma L_{12} \psi_{1\beta} \psi_{2\alpha} / J - M_c / J \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора соответственно; J – суммарный приведенный момент инерции ротора электродвигателя и рабочего колеса вентилятора; M_c – момент сопротивления на валу двигателя.

Модель предусматривает следующие допущения:

- 1) распределение магнитного поля вдоль окружности воздушного зазора двигателя считается синусоидальным;
- 2) статор и ротор имеют трехфазные симметричные обмотки;
- 3) не учитывается неоднородность магнитной проводимости, обусловленная наличием пазов и неравномерностью воздушного зазора;
- 4) не учитывается гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе;
- 5) механическая часть двигателя представлена одностепенной системой, но значение момента инерции ротора включает в себя также приведенный момент инерции элементов механической передачи, а значение момента сопротивления включает в себя приведенные значения всех внешних по отношению к ротору двигателя моментов и усилий.

В данной модели активные сопротивления и индуктивности являются переменными величинами, рассматриваемыми как внутренние возмущения.

Индуктивности в модели изменяются в связи с насыщением АД ввиду зависимости величины взаимной индуктивности от тока намагничивания. Для получения данной нелинейной зависимости производится аппроксимация кривой намагничивания (рисунок 10), полученной из справочника [45] для электротехнической стали.

Представленную кривую аппроксимируем уравнением четвертого порядка на интервале по оси абсцисс от 0,01 до 1,01:

$$L_{12} = \frac{-0,0465(K_i i_{12})^4 + 0,3859(K_i i_{12})^3 - 1,1592(K_i i_{12})^2 + 1,745(K_i i_{12}) + 0,0004}{K_\psi i_{12}}, \quad (10)$$

где K_i , K_ψ - коэффициенты пропорциональности по току и магнитному потоку соответственно; i_{12} - ток цепи намагничивания, А.

Ввиду выбранного для аппроксимации интервала кривая ограничивается сверху значением L_{12H} , а снизу – значением 0,01 от L_{12H} .

Ток намагничивания определяем как:

$$i_{12} = \sqrt{(i_{1\alpha} + i_{2\alpha})^2 + (i_{1\beta} + i_{2\beta})^2}, \quad (11)$$

а соответствующие коэффициенты находим по формулам:

$$K_i = \frac{1}{i_{12H}} = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot L_{12H}}{u_{1H}}; \quad (12)$$

$$K_\psi = \frac{1}{\psi_{12H}} = \frac{1}{L_{12H} i_{12H}} = \frac{K_i}{L_{12H}}. \quad (13)$$

Активные сопротивления в модели изменяются в связи с вытеснением тока и нагревом [85].

Вытеснение тока моделируем с учетом скольжения по формуле:

$$R_{2\sigma} = R_{2H} + R_{\kappa 3} \frac{2\pi \cdot f - p\omega}{2\pi \cdot f}, \quad (14)$$

при этом дополнительно учитываем, что при вытеснении изменяется и индуктивность рассеяния ротора, что описывается пропорцией:

$$L_{2\sigma} = L_{2\sigma n} \frac{R_2}{R_{2n}} \quad (15)$$

Представленное математическое описание существенно упрощено по отношению к реальным физическим процессам, протекающим в АД, однако для рассматриваемой задачи применение данных формул корректно, т.к. за основу принято частотное управление двигателем.

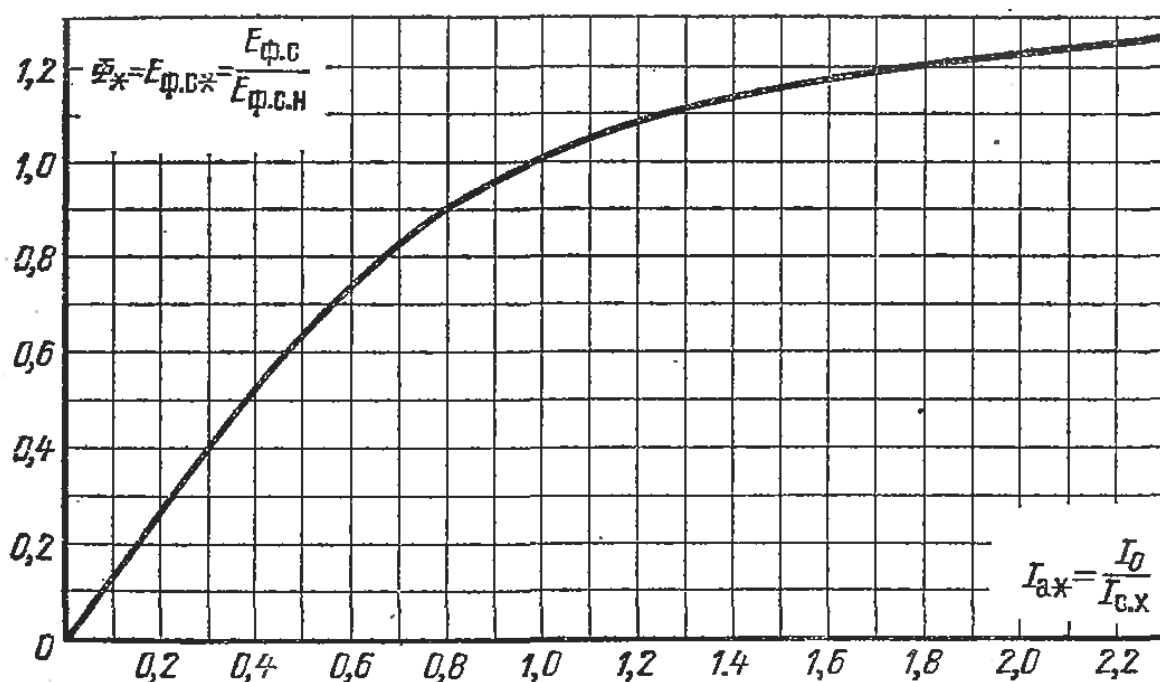


Рисунок 10. Кривая намагничивания электротехнической стали

Изменение сопротивления в связи с нагревом учтем следующим образом:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{1n}(1 + \alpha\tau); \\ R_2 &= R_{2n}(1 + \alpha\tau), \end{aligned} \quad (16)$$

где R_1 , R_2 - активное сопротивление цепи статора и ротора соответственно, Ом; R_{1n} , R_{2n} - номинальное значение активного сопротивления цепи статора и ротора соответственно, Ом; α - температурный коэффициент, $1/^\circ\text{C}$; τ - начальная температура, $^\circ\text{C}$.

причем нагрев по ротору учитывается мультипликативно с вытеснением тока, температурный коэффициент принимаем для меди $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, а начальная температура соответствует 20°C , для которой приведены табличные значения сопротивлений АД.

Текущую температуру найдем по упрощенной тепловой модели, где расчетную температуру $\tau_{расч}$ примем через класс изоляции двигателя F равной $(115-20)^\circ\text{C}$, а текущую найдем при номинальных омических потерях:

$$T_{наг} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{расч} \frac{i_1^2 R_1 + i_2^2 R_2}{\Delta P_n}, \quad (17)$$

где постоянную времени $T_{наг}$ примем 20 минут.

Вентиляционная сеть описывается системой дифференциальных уравнений движения и неразрывности воздушного потока в частных производных [113]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial H(x,t)}{\partial x} = L(\rho) \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + RQ^2(x,t); \\ -\frac{\partial H(x,t)}{\partial t} = C(\rho) \frac{\partial H(x,t)}{\partial x}, \end{cases} \quad (18)$$

где H , Q – напор и расход воздуха; $L(\rho)$, $C(\rho)$ – погонная акустическая масса и гибкость; ρ – плотность воздуха; R – сопротивление вентиляционной сети.

Для решения этих уравнений в работе вентиляционная сеть представляется набором элементарных звеньев длиной, равной длине серийно выпускаемых вентиляционных труб, которые в работе приняты 12 м.

При решении задачи динамики переходных процессов было принято воспользоваться методом конечно-элементного моделирования (КЭМ). Вентиляционная сеть при этом рассматривается как набор элементарных участков определенной длины, в работе принятой длине серийно выпускаемых вентиляционных труб – 12 м. При этом для пер-

вого участка вентиляционной сети начальные условия будут соответствовать параметрам напора и расхода на выходе из вентилятора.

$$\begin{cases} -\frac{\partial H(x,t)}{\partial x} = L(\rho) \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + RQ^2(x,t); \\ -\frac{\partial H(x,t)}{\partial x} = C(\rho) \frac{\partial H(x,t)}{\partial t}; \\ H_0 = H_{\text{ВМП}}(t) \geq 0; \\ Q_0 = Q_{\text{ВМП}}(t) \geq 0, \end{cases} \quad (19)$$

где $H(x,t)$ – напор; $Q(x,t)$ – подача; $L(\rho)$, $C(\rho)$ – акустическая масса и гибкость; ρ – плотность воздушной смеси.

Для следующего участка входные параметры будут определяться выходными данными из первого отрезка и т.д.

$$\begin{cases} -\frac{H_i(t) - H_{i-1}(t)}{\partial x} = L(\rho) \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + RQ^2(x,t); \\ -\frac{H_i(t) - H_{i-1}(t)}{\partial x} = C(\rho) \frac{\partial H(x,t)}{\partial t}; \\ H_1 = H_0 - dH; \\ Q_1 = Q_0 - dQ. \end{cases} \quad (20)$$

Таким образом, решение задачи динамики переходных процессов в вентиляционной сети сводится к решению массива из конечного количества систем дифференциальных уравнений с известными начальными условиями. Точность решения этого массива напрямую зависит от количества элементарных участков.

Процесс перемешивания газа в призабойном пространстве описывается уравнением конвективно-турбулентной диффузии[113]:

$$\frac{\partial C_0(x,t)}{\partial t} + V \frac{\partial C_0(x,t)}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C_0(x,t)}{\partial x^2}, \quad (21)$$

где, $D = D(V)$ – коэффициент турбулентной диффузии активного газа; C_0 – концентрация газа в выработке, V – скорость течения.

По полученному математическому описанию построена модель системы ПЧ-АД-ВМП-ВС в среде Matlab/Simulink. Модель приведена в

приложении 3. В данной модели газовыделение предполагалось из сосредоточенного источника, расположенного в призабойном пространстве. В качестве модели газовыделения применялся генератор случайных чисел с нормальным законом распределения, математическое ожидание которого принято равным расчетной газоносности, а среднеквадратичное отклонение – половине $dC^*_{г}$.

Указанная модель обладает нелинейными свойствами, что дополнительно ставит задачу настройки ПИД регуляторов, входящих в состав предлагаемой САУ, поскольку нелинейность объекта управления формально препятствует применению традиционных методов линейной теории автоматического управления. В то же время, согласно [69] переходные процессы системы ВМП-ВС достаточно точно аппроксимируются инерционным звеном второго порядка с запаздыванием, параметры которого можно определить по опыту запуска.

2.2.2 Расчет параметров модели

Для моделирования и анализа работы системы вентиляции тупиковой необходимо произвести расчет параметров математической модели.

Расчет вентилятора для проветривания выработки был произведен на основании методики, указанной в Руководстве по проектированию вентиляции угольных шахт. В качестве объекта исследования была выбрана тупиковая выработка, расположенная на шахте Красноярская ОАО «СУЭК – Кузбасс» со следующими параметрами: длина выработки 600 м, с поперечным сечением 12,8 м², проводимой комбайном без применения буровзрывных работ, самоходное оборудование с ДВС не применяется. Газообильность выработки по метану составляет 3 м³/мин. В забое одновременно работает 4 человека.

Расход воздуха по лимитирующим факторам:

- по людям:

$$Q_{n.з.}^n = 6 \cdot N_q = 6 \cdot 4 = 24 \text{ м}^3/\text{мин} = 0,4 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (22)$$

где N_q - количество одновременно работающих человек в забое;

- по горючим газам:

$$Q_{n.з.}^g = \frac{I_z}{C_{дон} - C_0} \cdot 100 = \frac{3 \cdot 100}{1 - 0} = 300 \text{ м}^3/\text{мин} = 5 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (23)$$

где $C_{дон}$, C_0 - концентрация метана, соответственно допустимая в исходящей струе и начальная в поступающей;

I_z - абсолютная газообильность, $\text{м}^3/\text{мин}$;

- по выхлопным газам - нет;

- по газам от взрывных работ - нет.

К расчету принимаем наибольшее из полученных значений - $Q_{n.з.}^{\max} = 5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Полученное значение проверяем по допустимой скорости движения воздуха:

$$Q_{v.\min.} \leq Q_{n.з.}^{\max} \leq Q_{v.\max.} \quad (24)$$

Расход воздуха, обеспечивающий минимально-допустимую скорость движения воздуха:

$$Q_{v.\min.} = S_{\epsilon} \cdot v_{\min} = 0,25 \cdot 12,8 = 3,2 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (25)$$

где S_{ϵ} - площадь выработки в свету, м^2 ; $v_{\min}$ - минимально-допустимая скорость движения воздуха в выработке $\text{м}/\text{с}$.

Расход воздуха, обеспечивающий максимально-допустимую скорость движения воздуха:

$$Q_{v.\max.} = S_{\epsilon} \cdot v_{\max} = 4,0 \cdot 12,8 = 51,2 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (26)$$

где $v_{\max}$ - максимально-допустимая скорость движения воздуха в выработке $\text{м}/\text{с}$.

Значение расхода воздуха удовлетворяет требованиям безопасности по минимально-допустимой скорости движения воздуха в подготовительных забоях газовых шахт, следовательно, принимаем $Q_{n.з.}^p = 5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Определяем параметры вентилятора местного проветривания для вентиляции тупикового забоя:

- расход воздуха, проходящего через вентилятор

$$Q_{ВМП} = k_{ут.тр.} \cdot Q_{н.з.}^p = 1,06 \cdot 5 = 5,3 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (27)$$

где $k_{ут.тр.} = 1,06$ - коэффициент утечек в трубопроводе;

- депрессия вентилятора:

$$h_{ВМП} = h_{тр} + h_{м} + h_{дин.} = 2112,4 + 211,2 + 212 = 2535,6 \text{ Па}, \quad (28)$$

депрессия трения трубопровода:

$$h_{тр} = R \cdot Q_{ВМП}^2 = 75,2 \cdot 5,3^2 = 2112,4 \text{ Па}, \quad (29)$$

где аэродинамическое сопротивление трения:

$$R = \alpha \cdot \frac{6,5 \cdot L}{d^5} = 0,0015 \cdot \frac{6,5 \cdot 600}{0,6^5} = 75,2 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8, \quad (30)$$

α - коэффициент аэродинамического сопротивления трубопровода, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$, $\alpha = 0,0015 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; L - длина трубопровода, м; d - диаметр трубопровода, м;

депрессия динамическая:

$$h_{дин.} = \rho \cdot \frac{v_{тр.}^2}{2} = 1,2 \cdot \frac{18,8^2}{2} = 212 \text{ Па}, \quad (31)$$

где скорость движения воздуха на выходе из трубопровода:

$$v_{тр.} = \frac{Q_{н.з.}^p}{S_{тр.}} = \frac{5,3}{0,2826} = 18,8 \text{ м/с}, \quad (32)$$

ρ - плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$S_{тр.}$ - площадь поперечного сечения трубопровода, м^2 ;

депрессия, затрачиваемая на преодоление местных сопротивлений:

$$h_{м} = 0,1 \cdot h_{тр} = 0,1 \cdot 2112,4 = 211,2 \text{ Па}, \quad (33)$$

По полученным параметрам – необходимому расходу воздуха и депрессии – выбираем вентилятор местного проветривания вентилятор которым соответствует ВМЭ-6.

Вентилятор ВМЭ – 6 комплектуется асинхронным электродвигателем ВРМ160М2, параметры которого приведены в таблице 4.

Параметры вентилятора приведены в таблице 5, в таблице 6 приводятся параметры приводного электродвигателя, аэродинамические характеристики представлены на рисунке 11, где обозначено P_v – полное давление вентилятора, Па; Q – подача вентилятора, м³/с; 1, 2 – соответственно один или два вентилятора ВМЭ-6 соединенных последовательно; 3, 4 – соответственно трубопровод диаметром 600 и 800 мм.

Таблица 5. Параметры вентилятора местного проветривания ВМЭ-6

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
Номинальный диаметр, мм	630
Номинальная подача Q_n , м ³ /с	7
Номинальное полное давление H_n , Па	2500
Максимальный полный КПД вентилятора, %	68
Уровень звуковой мощности, дБА	118
Электродвигатель	2ВРМ160М2
мощность, кВт	25
напряжение, В	380/660
частота вращения, об/мин	3000
частота сети, Гц	50
Уровень взрывозащиты двигателя	РВ-3В
Степень защиты двигателя	IP – 54
Длина проветривания, м	

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
одним вентилятором	600
двумя вентиляторами	1000
Сечение проветриваемых выработок, м ²	10 – 14
Масса комплекта, кг	420

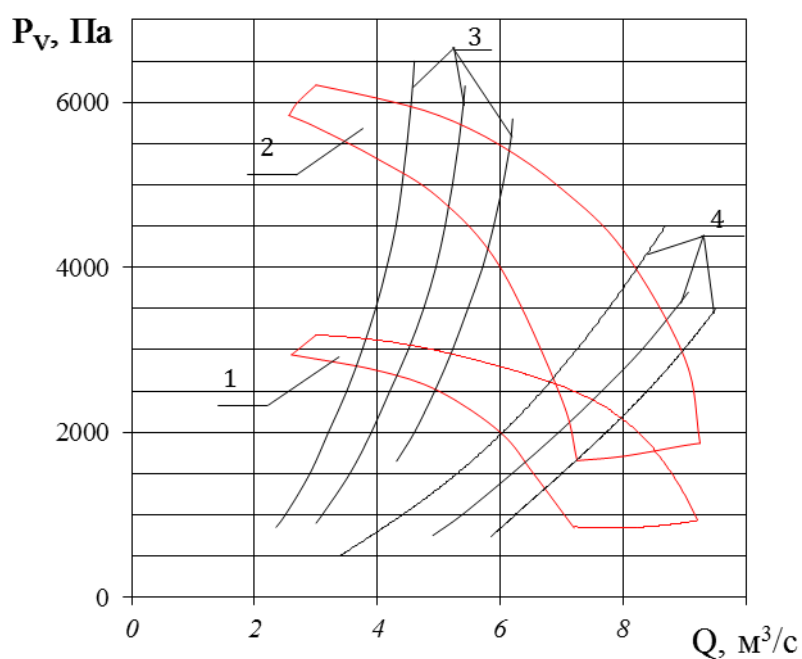


Рисунок 11. Аэродинамические характеристики ВМЭ - 6

Таблица 6. Параметры электродвигателя ВРМ160М2

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
Мощность P_n , кВт	25
Номинальное напряжение $U_{ф.ном}$, В	380
Скольжение s_n , %	2,6
Синхронная частота вращения n_0 , об/мин	3 000
КПД η_n , %	91

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
$\cos\varphi_n$	0,88
Кратность начального пускового вращающего момента к номинальному	1,9
Кратность начального пускового тока к номинальному	6
Кратность минимального вращающего момента к номинальному	1,3
Кратность максимального вращающего момента к номинальному	2,5
Момент инерции, кг/м ²	0,085
Удельная масса, кг/кВт	9,5
Радиальное усилие, воздействующее на рабочий конец вала, Н, не более	180
Осевое усилие, воздействующее на рабочий конец вала, Н, не более	950
Масса, кг	228+5%
Активное сопротивление фазы статора R_s , Ом	0,455
Приведенное активное сопротивление ротора R_r , Ом	0,413
Индуктивность рассеяния статора и ротора $L_{\sigma s}$ и $L_{\sigma r}$, Гн	0,0048
Индуктивность взаимной индукции L_μ , Гн	0,698

Расчет параметров электродвигателя производился по методике, изложенной в [134]

Номинальный ток фазы:

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{ф.ном} \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot \eta_{ном}} = \frac{24 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,91} = 26,29 \text{ А.} \quad (34)$$

Угловая скорость холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314,159 \text{ рад/с.} \quad (35)$$

Номинальная угловая скорость:

$$\omega_{ном} = \omega_0 \cdot (1 - s_{ном}) = 314,159 \cdot (1 - 0,026) = 305,991 \text{ рад/с.} \quad (36)$$

Номинальный момент на валу электродвигателя:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\omega_{ном}} = \frac{24 \cdot 10^3}{305,991} = 78,434 \text{ Н·м.} \quad (37)$$

Номинальные потери мощности:

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}} \cdot 10^3 = \frac{24 \cdot (1 - 0,91)}{0,91} \cdot 10^3 = 2373,626 \text{ Вт.} \quad (38)$$

Номинальные механические потери мощности:

$$\Delta P_{мх.ном} = (0,02 - 0,15) \cdot \Delta P_{ном} = 0,1 \cdot \Delta P_{ном} = 0,1 \cdot 2373,626 = 237,363 \text{ Вт.} \quad (39)$$

Добавочные потери, связанные с вращением ротора:

$$\Delta P_{доб.2} = (0,01 - 0,05) \cdot \Delta P_{ном} = 0,03 \cdot \Delta P_{ном} = 0,03 \cdot 2373,626 = 71,209 \text{ Вт.} \quad (40)$$

Момент холостого хода:

$$M_0 = \frac{\Delta P_{мх.ном} + \Delta P_{доб.2}}{\omega_0} = \frac{237,363 + 71,209}{314,159} = 0,982 \text{ Н·м.} \quad (41)$$

Номинальный электромагнитный момент:

$$M_{э.ном} = M_{ном} + M_0 = 0,982 + 78,434 = 79,416 \text{ Н·м.} \quad (42)$$

Номинальные потери в роторе:

$$\Delta P_{пер.2ном} = M_{э.ном} \cdot \omega_0 \cdot s_{ном} = 79,416 \cdot 314,159 \cdot 0,026 = 648,68 \text{ Вт.} \quad (43)$$

Коэффициент загрузки, при котором КПД максимален:

$$K_{э.м} = 0,5 - 1,0 = 0,7$$

Номинальные переменные потери мощности:

$$\Delta P_{пер.ном} = \frac{\Delta P_{ном}}{1 + K_{3.т}^2} = \frac{2373,626}{1 + 0,7^2} = 1593,038 \text{ Вт.} \quad (44)$$

Постоянные потери:

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{ном} - \Delta P_{пер.ном} = 2373,626 - 1593,038 = 780,589 \text{ Вт.} \quad (45)$$

Номинальные потери мощности в статоре:

$$\Delta P_{пер.1ном} = \Delta P_{пер.ном} - \Delta P_{пер.2ном} = 1593,038 - 648,68 = 944,358 \text{ Вт.} \quad (46)$$

Активное сопротивление фазы статора:

$$R_1 = \frac{\Delta P_{пер.1ном}}{3 \cdot I_{1ном}^2} = \frac{944,358}{3 \cdot 26,289^2} = 0,455 \text{ Ом.} \quad (47)$$

Максимальный электромагнитный момент:

$$M_{э.т} = M_{\max} + M_0 = \lambda_t \cdot M_{ном} + M_0 = 2,5 \cdot 78,434 + 0,982 = 197,066 \text{ Н·м.} \quad (48)$$

Коэффициент с размерностью сопротивления:

$$b = \frac{3 \cdot U_{ф.ном}^2}{\Delta P_{пер.2ном}} \cdot s_{ном} - 2 \cdot R_1 = \frac{3 \cdot 380^2}{684,68} \cdot 0,026 - 2 \cdot 0,455 = 16,452 \text{ Ом.} \quad (49)$$

Сопротивление:

$$Z = \frac{3 \cdot U_{ф.ном}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{э.т}} - R_1 = \frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 314,159 \cdot 197,066} - 0,455 = 3,043 \text{ Ом.} \quad (50)$$

Приведенное активное сопротивление ротора:

$$\begin{aligned} R'_{2,0} &= 0,5 \cdot s_{ном} \cdot \left(b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot Z^2} \right) = \\ &= 0,5 \cdot 0,026 \cdot \left(16,452 + \sqrt{16,452^2 - 4 \cdot 3,043^2} \right) = 0,413 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (51)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{к,0} = \sqrt{Z^2 - 4 \cdot R'^2_{2,0}} = \sqrt{3,043^2 - 4 \cdot 0,413^2} = 3,009 \text{ Ом.} \quad (52)$$

Критическое скольжение:

$$s_{\kappa} = \frac{R'_{2,0}}{Z} = \frac{0,413}{3,043} = 0,136. \quad (53)$$

Отношение активных сопротивлений:

$$a = \frac{R_1}{R_{2.0}'} = \frac{0,455}{0,413} = 1,104. \quad (54)$$

Электромагнитный момент при номинальном скольжении по формуле Клосса:

$$M(s_{ном}) = \frac{2 \cdot M_{э.м} \cdot (1 + a \cdot s_{\kappa})}{\frac{s_{ном}}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s_{ном}} + 2 \cdot a \cdot s_{\kappa}} = \frac{2 \cdot 197,066 \cdot (1 + 1,104 \cdot 0,136)}{\frac{0,026}{0,136} + \frac{0,136}{0,026} + 2 \cdot 1,104 \cdot 0,136} = 79,416 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (55)$$

Погрешность с предыдущим расчетом:

$$\Delta m = \frac{M(s_{ном}) - M_{э.ном}}{M_{э.ном}} = \frac{79,416 - 79,416}{79,416} = 0, \quad (56)$$

отсутствует, считаем расчет верным.

Индуктивное сопротивление статора и ротора:

$$X_{1.0} \approx X_{2.0}' = 0,5 \cdot X_{\kappa.0} = 0,5 \cdot 3,001 = 1,5 \text{ Ом}. \quad (57)$$

Индуктивность рассеяния статора и ротора:

$$L_{\sigma S} = L_{\sigma R} = \frac{X_{1.0}}{2 \cdot \pi \cdot f_{ном}} = \frac{X_{2.0}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{ном}} = \frac{1,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0048 \text{ Гн}. \quad (58)$$

Ток холостого хода:

$$I_0 = I_{1ном} \cdot \left(\sin \varphi_{ном} - \frac{\eta_{ном} \cdot \cos \varphi_{ном}}{2 \cdot \lambda_{ном}} \right) = 26,289 \cdot \left(0,2256 - \frac{0,91 \cdot 0,88}{2 \cdot 2,5} \right) = 1,72 \text{ А}. \quad (59)$$

Потери в стали:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{пост} - (\Delta P_{мх.ном} + \Delta P_{доб.2}) = 780,589 - (237,362 + 71,209) = 472,017 \text{ Вт}. \quad (60)$$

Эквивалентное сопротивление потерь в стали:

$$R_{\mu} = \frac{\Delta P_{ст}}{3 \cdot I_0^2} = \frac{472,017}{3 \cdot 1,72^2} = 53,16 \text{ Ом}. \quad (61)$$

Синус угла:

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \left[\frac{(R_1 + R_{\mu}) \cdot I_0}{U_{\phi.ном}} \right]^2} = \sqrt{1 - \left[\frac{(0,455 + 53,16) \cdot 1,72}{380} \right]^2} = 0,999. \quad (62)$$

Индуктивное сопротивление взаимной индукции:

$$X_{\mu} = \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{I_0} \cdot \sin \varphi_0 - X_{1,0} = \frac{380}{1,72} \cdot 0,999 - 1,5 = 219,375 \text{ Ом.} \quad (63)$$

Индуктивность взаимной индукции:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{ном}}} = \frac{219,374}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,698 \text{ Гн.} \quad (64)$$

При регулировании частоты вращения вентилятора применение скалярных законов частотного регулирования обусловлено их относительной простотой реализации. Помимо общепринятого для вентиляторной нагрузки закона U/f^2 , представляется целесообразным рассмотреть возможность поддержания постоянной перегрузочной способности электрического двигателя, так как этот способ позволяет во всем диапазоне регулирования получить номинальные коэффициент мощности и к.п.д. двигателя, что само по себе является оптимальным.

То есть, обеспечивается следующее соотношение:

$$\frac{M_{\text{кн}}}{M_{\text{сн}}} = \frac{M_{\text{к1}}}{M_{\text{с1}}}, \quad (65)$$

где $M_{\text{кн}}$, $M_{\text{сн}}$ – номинальный критический момент и момент сопротивления на валу электродвигателя, Н·м; $M_{\text{к1}}$, $M_{\text{с1}}$ – критический момент и момент сопротивления при отличной от номинальной частоте питающей сети.

$$M_{\text{сн}} = \beta \cdot \omega^2 = 0,0007 \cdot 305,99^2 = 65,541 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (66)$$

где β – коэффициент вентиляторной нагрузки, определенный по аэродинамическим характеристикам вентилятора и вентиляционной сети, на которую он работает; ω – угловая частота вращения двигателя, рад/с.

$$M_{\text{кн}} = \frac{3 \cdot U_{\text{н}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot X_{\text{к}}} = \frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 314,16 \cdot 3,009} = 229,132 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (67)$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное питающее напряжение электродвигателя, В; ω_0 – синхронная частота вращения электродвигателя, рад/с:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}; \quad (68)$$

индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом:

$$X_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_{\sigma S} + L_{\sigma R}). \quad (69)$$

Соотношение моментов определяется из следующего выражения:

$$\frac{M_{KH}}{M_{CH}} = \frac{229,132}{65,541} = 3,496. \quad (70)$$

Далее находим:

$$\begin{aligned} \frac{M_{K1}}{M_{C1}} &= \frac{3 \cdot U^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot X_k \cdot \beta \cdot \omega^2} = \\ &= \frac{3 \cdot U^2}{2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_{\sigma S} + L_{\sigma R}) \cdot \beta \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}\right)^2} = \\ &= \frac{3 \cdot U^2}{2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_{\sigma S} + L_{\sigma R}) \cdot \beta \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{1}\right)^2} = \\ &= \frac{3 \cdot U^2}{32 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot (L_{\sigma S} + L_{\sigma R}) \cdot \beta \cdot \pi^2 \cdot f^2} = \\ &= \frac{3 \cdot U^2}{32 \cdot \pi^4 \cdot f^4 \cdot (L_{\sigma S} + L_{\sigma R}) \cdot \beta} = \frac{3}{32 \cdot \pi^4 \cdot (L_{\sigma S} + L_{\sigma R}) \cdot \beta} \cdot \frac{U^2}{f^4} = \\ &= \frac{3}{32 \cdot \pi^4 \cdot (0,0048 + 0,0048) \cdot 0,0007} \cdot \frac{U^2}{f^4} = 143,22 \frac{U^2}{f^4}. \end{aligned}$$

То есть:

$$\frac{M_{KH}}{M_{CH}} = \frac{M_{K1}}{M_{C1}} = 143,22 \cdot \frac{U^2}{f^4} = 3,496. \quad (71)$$

Откуда линейное напряжение определяется как:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{\frac{3,496 \cdot f^4}{143,22}} = 0,156 \cdot f^2, \quad (72)$$

а фазное напряжение:

$$U_{\phi} = \sqrt{\frac{3,496 \cdot f^4}{3 \cdot 143,22}} = 0,09 \cdot f^2. \quad (73)$$

Произведя аппроксимацию аэродинамических характеристик вентилятора, получена таблица значений напора и расхода ограничивающих рабочую область аэродинамической характеристики вентилятора (рисунок 11).

Таблица 7. Численные значения границы рабочей области вентилятора ВМЭ-6

Параметр, значение, единицы измерения			
Кривая 1		Кривая 2	
Напор Н, кПа	Расход Q, м ³ /с	Напор Н, кПа	Расход Q, м ³ /с
840	7,2	930	9,2
1500	6,54	1250	9
2000	6	2150	8
2500	5	2500	7,2
2750	4	2800	6
2940	2,8	2980	5
2950	2,7	3090	4
2940	2,6	3180	3
Кривая 3		Кривая 4	
Напор Н, кПа	Расход Q, м ³ /с	Напор Н, кПа	Расход Q, м ³ /с
930	9,2	3180	3
840	8	2940	2,6
855	7,2	—	—

Аналогичным образом, произведя аппроксимацию характеристик вентиляционных сетей различного диаметра и для различной производительности вентилятора (рисунок 11), получена таблица их численных значений.

Таблица 8. Численные значения характеристик вентиляционных сетей

Параметр, значение, единицы измерения			
Кривая 1, 2м/с, d 600 мм		Кривая 2, 3м/с, d 600 мм	
Напор Н, кПа	Расход Q, м ³ /с	Напор Н, кПа	Расход Q, м ³ /с
1000	2,6	1000	3,1
1500	2,9	1500	3,5
2000	3,2	2000	3,9
2500	3,5	2500	4,1
3000	3,8	3000	4,5
3500	3,9	3500	4,7
Кривая 3, 4м/с, d 600 мм		Кривая 4, 2м/с, d 800 мм	
1650	4,3	500	3,3
2000	4,6	750	4
2500	4,95	1000	4,5
3000	5,3	1350	5
3500	5,5	1500	5,3
—	—	2000	6,1
—	—	2500	6,8
—	—	3000	7,2
—	—	3500	7,8
Кривая 5, 3м/с, d 800 мм		Кривая 6, 4м/с, d 800 мм	
750	4,9	750	5,9
1000	5,4	1000	6,3
1500	6,1	1500	6,95
2000	6,95	2000	7,8
2500	7,7	2500	8,4
3000	8,4	3000	9
—	—	3500	9,55

Исходя из данных аппроксимации аэродинамических характеристик и законов подобия вентиляторов были получены следующие зависимости:

1. Зависимость подачи вентилятора от частоты вращения рабочего колеса $Q(\omega)$.

В работе вентилятор представлен нелинейным коэффициентом представляющим зависимость подачи вентилятора от его частоты вращения $Q(\omega)$ рисунок 12, данная зависимость получена по статическим характеристикам вентилятора исходя из законов подобия вентиляторов [71], описываемых следующими выражениями:

$$\frac{Q_n}{Q_1} = \frac{H_n}{H_1} \left(\frac{D_n}{D_1} \right)^3; \quad (74)$$

$$\frac{H_n}{H_1} = \left(\frac{\omega_n}{\omega_1} \right)^2 \left(\frac{D_n}{D_1} \right)^2; \quad (75)$$

$$\frac{N_n}{N_1} = \left(\frac{\omega_n}{\omega_1} \right)^3 \left(\frac{D_n}{D_1} \right)^5, \quad (76)$$

где, Q_n , H_n , N_n , ω_n , D_n – номинальные подача, напор, мощность, частота вращения и диаметр рабочего колеса соответственно, Q_1 , H_1 , N_1 , ω_1 , D_1 – отличные от номинальных соответствующие параметры вентилятора.

Зная номинальные значения подачи, напора и частоты вращения из выражений (72) – (74) можно получит зависимость $Q(\omega)$, при этом диаметр рабочего колеса при этом остается постоянным.

$$\frac{Q_n}{Q_1} = \frac{H_n}{H_1}; \quad (77)$$

$$\frac{H_n}{H_1} = \left(\frac{\omega_n}{\omega_1} \right)^2; \quad (78)$$

$$\frac{Q_n}{Q_1} = \left(\frac{\omega_n}{\omega_1} \right)^2; \quad (79)$$

Таблица 9. Численные значения подачи и частоты вращения вентилятора

Параметр, значение, единицы измерения	
Подача вентилятора Q, м ³ /с	Угловая частота вращения ω , рад/с
3,406	305,97
3,054	248,35
2,741	198,68
2,31	149,01
1,879	99,34

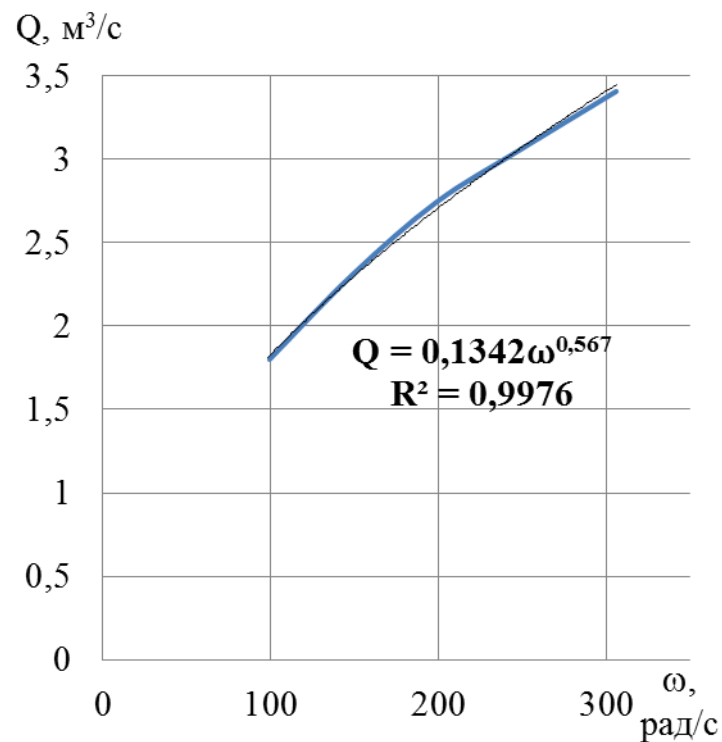


Рисунок 12. Зависимость подачи вентилятора от частоты вращения рабочего колеса $Q(\omega)$

2. Зависимость момента сопротивления на валу двигателя от частоты вращения

Таблица 10. Численные значения момента сопротивления и частоты вращения вентилятора

Параметр, значение, единицы измерения	
Момент сопротивления на валу двигателя M_c , Н·м	Угловая частота вращения ω , рад/с
65,36619	305,9686
43,06572	248,3511
27,56206	198,6809
15,50366	149,0107
6,890516	99,34045

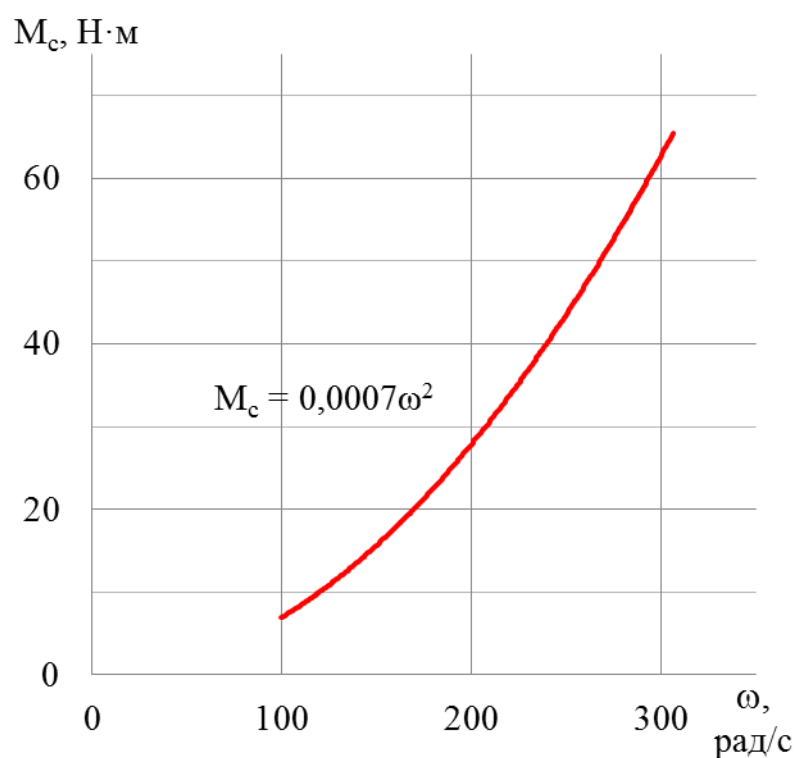


Рисунок 13. Зависимость момента сопротивления на валу двигателя от частоты вращения $M_c(\omega)$

Для идентификации вентилятора как объекта управления в среде 3D моделирования была построена объемная модель вентилятора (рисунок 14). Далее модель была передана в комплекс конечно-элементного моделирования. Результаты приведены на рисунке 15.

Для настройки регуляторов САУ была произведена идентификация системы ПЧ-ВМП-ВС как объекта управления при ступенчатом задании управляющего воздействия различной интенсивности.

В ходе идентификации система ПЧ – ВМП – ВС описана передаточной функцией:

$$W_Q(p) = \frac{k}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1} \cdot e^{-T_3 p}, \quad (80)$$

где T_1 , T_2 , T_3 – постоянные времени; k – коэффициент усиления, а каждый из параметров имеет нелинейную зависимость от заданного потока воздуха на выходе вентиляционной сети $Q^*_{\text{вых}}$, которая приведена на рисунках 16 - 20.

Аналогичным образом идентифицирована передаточная функция, описывающая изменение концентрации метана в призабойном пространстве:

$$W_{\text{CH}_4}(p) = \frac{k_{1(\text{CH}_4)}}{T_{\text{CH}_4} \cdot p + 1} + \frac{k_{2(\text{CH}_4)}}{p}, \quad (81)$$

где T_{CH_4} – постоянная времени, $k_{1(\text{CH}_4)}$, $k_{2(\text{CH}_4)}$ – коэффициенты усиления, а их зависимость от потока воздуха приведена на рисунках 20 - 22.

Для CO, соответственно:

$$W_{\text{CO}}(p) = \frac{k_{1(\text{CO})}}{T_{\text{CO}} \cdot p + 1} + \frac{k_{2(\text{CO})}}{p}, \quad (82)$$

где T_{CO} – постоянная времени, $k_{1(\text{CO})}$, $k_{2(\text{CO})}$ – коэффициенты усиления, а их зависимость от потока воздуха приведена на рисунках 23 - 25.

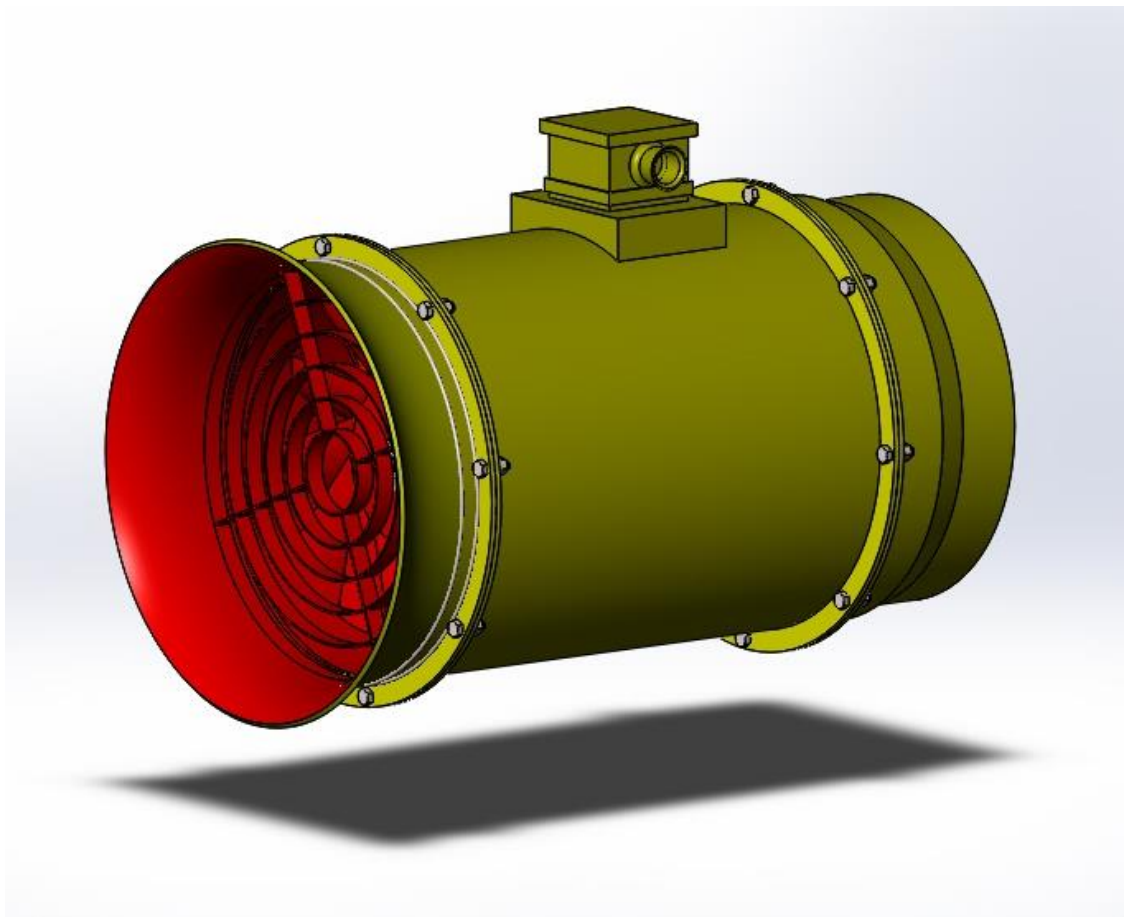


Рисунок 14. 3D-модель вентилятора ВМЭ-6

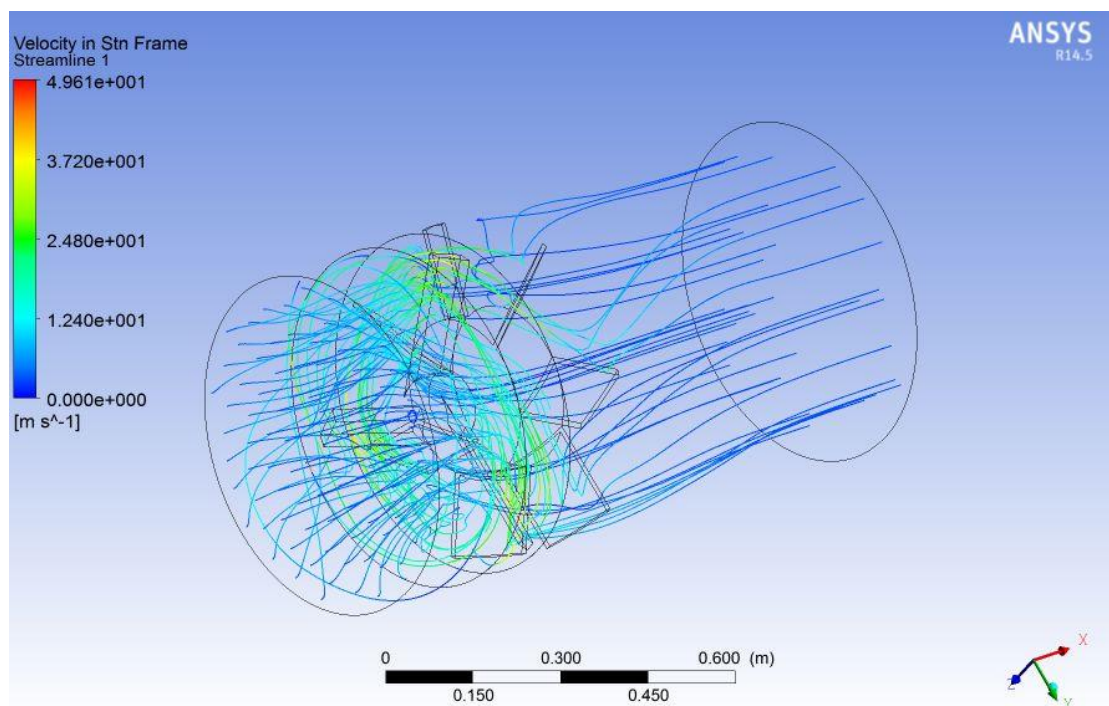


Рисунок 15. Результаты комплекс конечно-элементного моделирования вентилятора

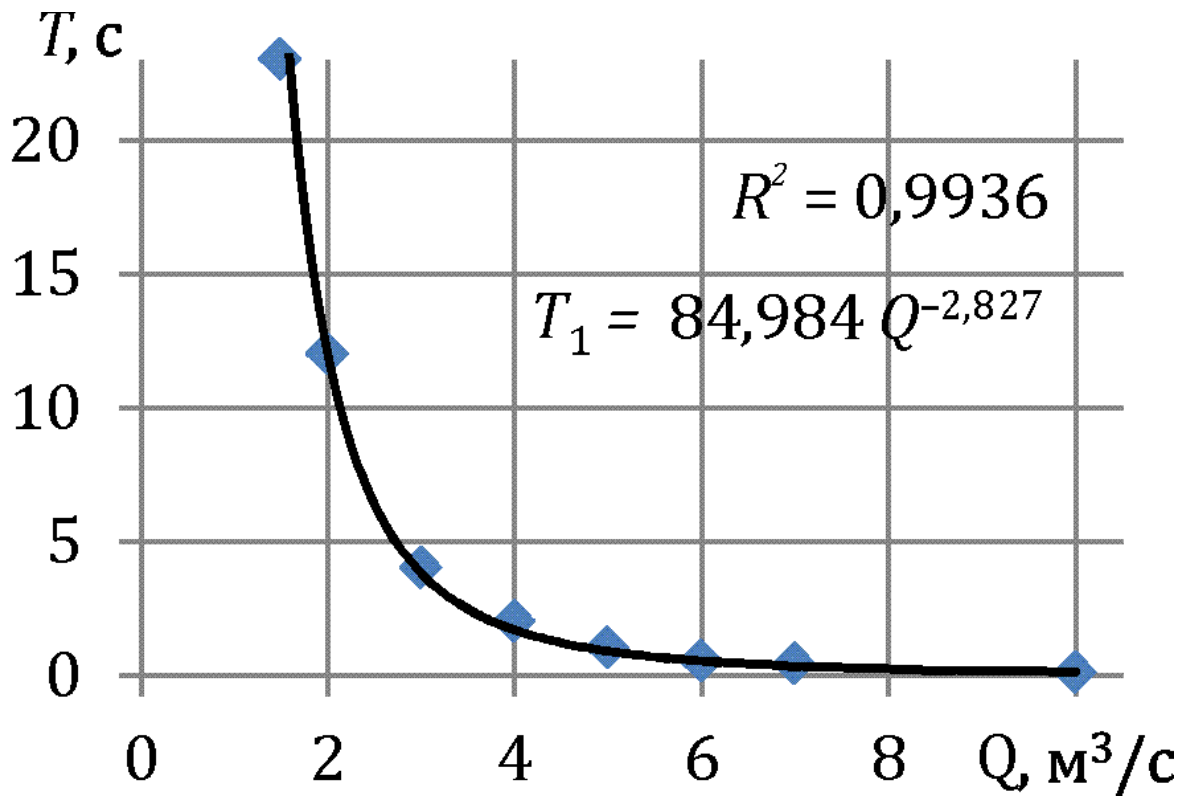


Рисунок 16. Постоянная времени T_1 передаточной функции системы ПЧ – ВМП – ВС

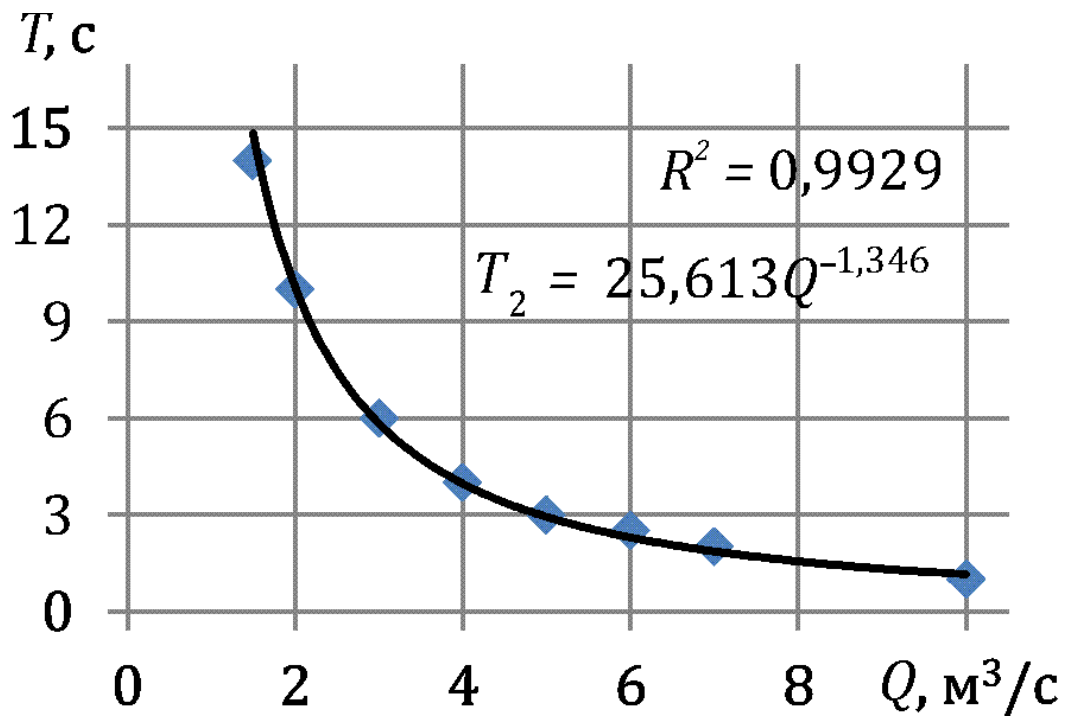


Рисунок 17. Постоянная времени T_2 передаточной функции системы ПЧ – ВМП – ВС

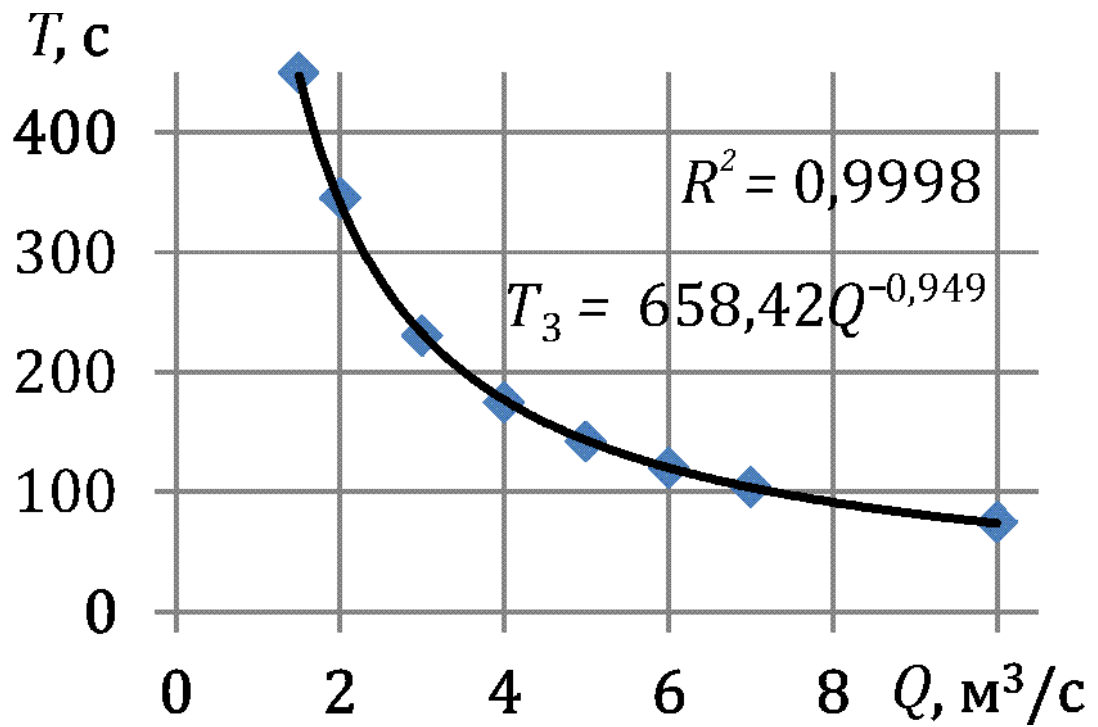


Рисунок 18. Постоянная времени T_3 передаточной функции системы ПЧ – ВМП – ВС

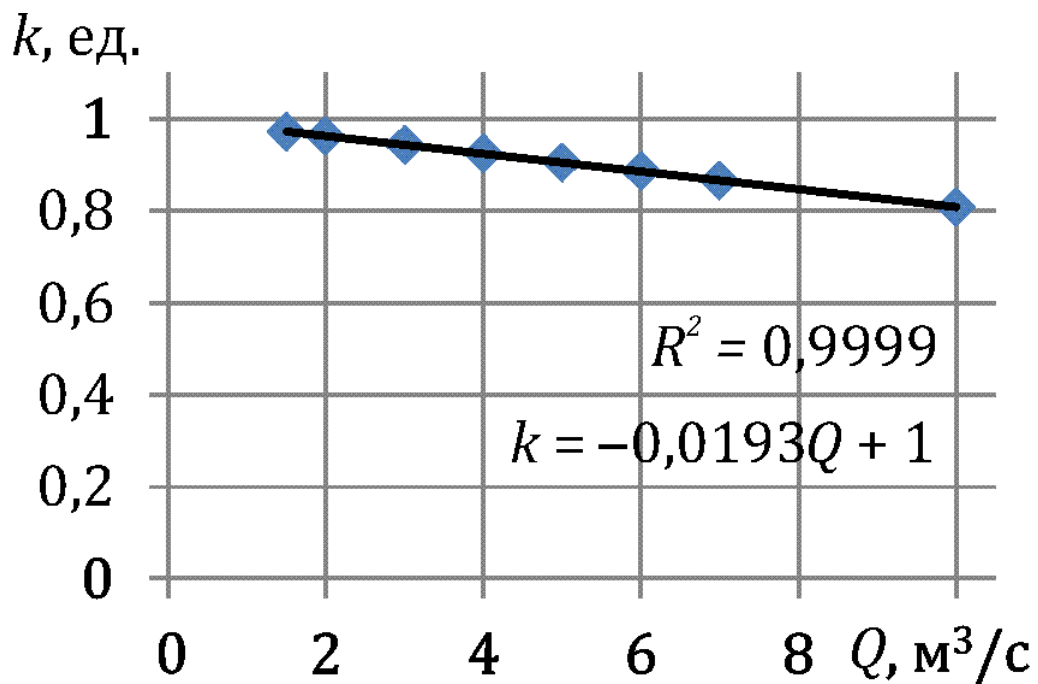


Рисунок 19. Коэффициент пропорциональности k_1 передаточной функции системы ПЧ – ВМП – ВС

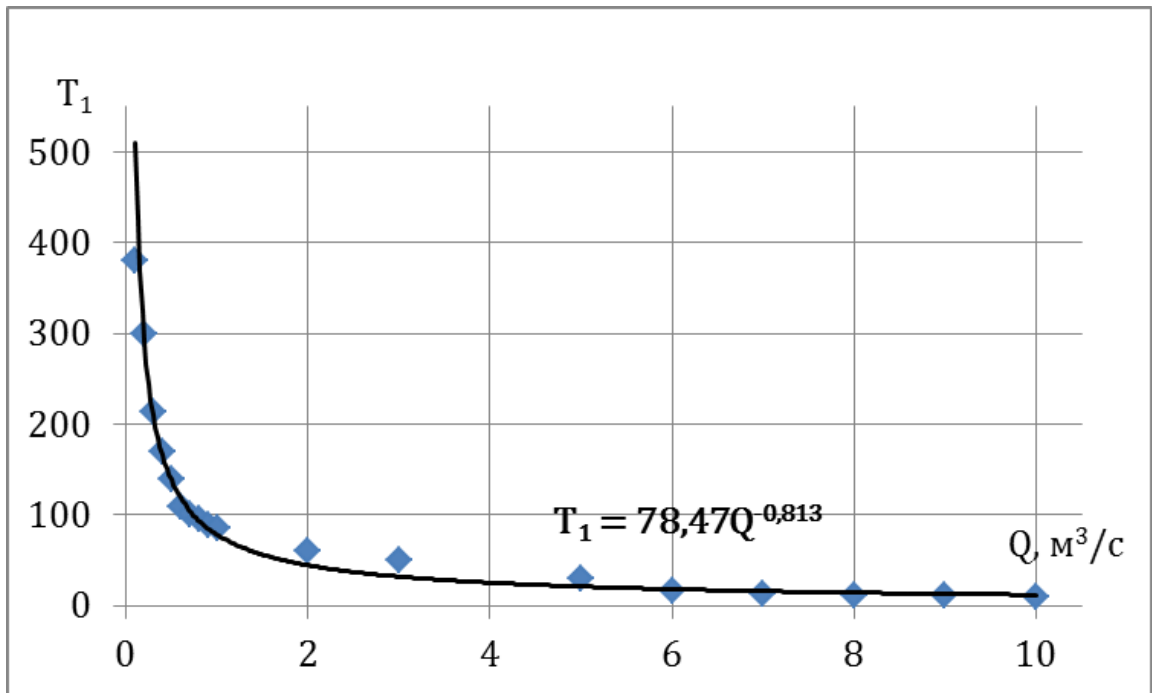


Рисунок 20. Постоянная времени T_1 передаточной функции изменения концентрации метана в призабойном пространстве

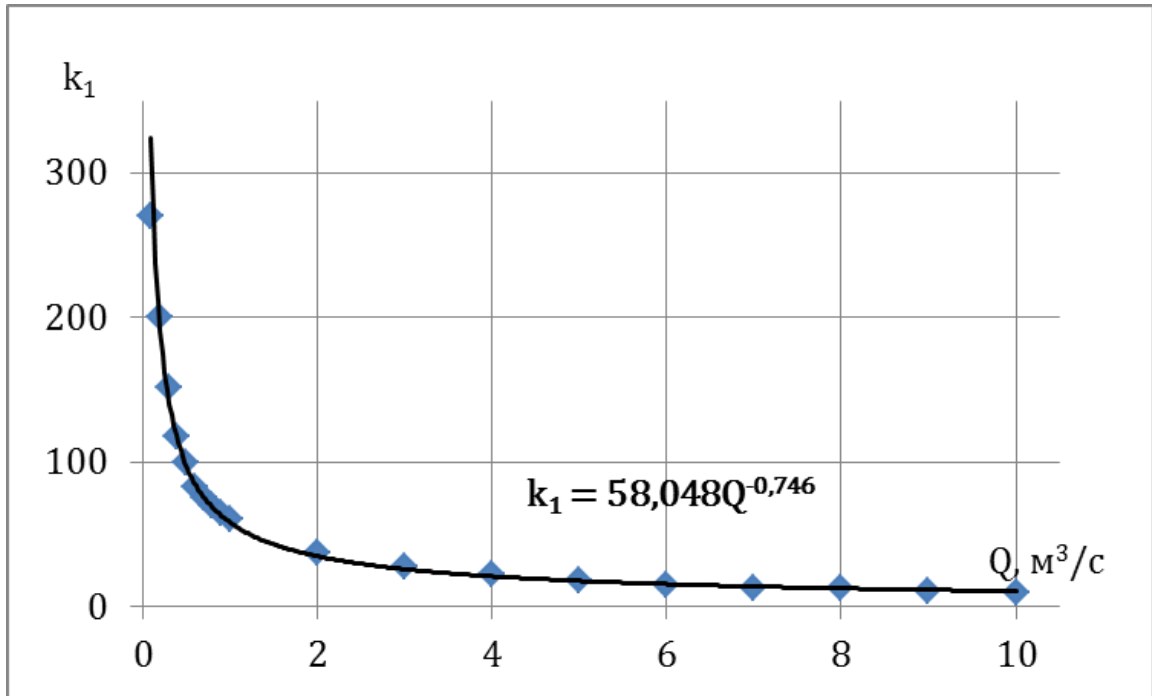


Рисунок 21. Коэффициент пропорциональности k_1 передаточной функции изменения концентрации метана в призабойном пространстве

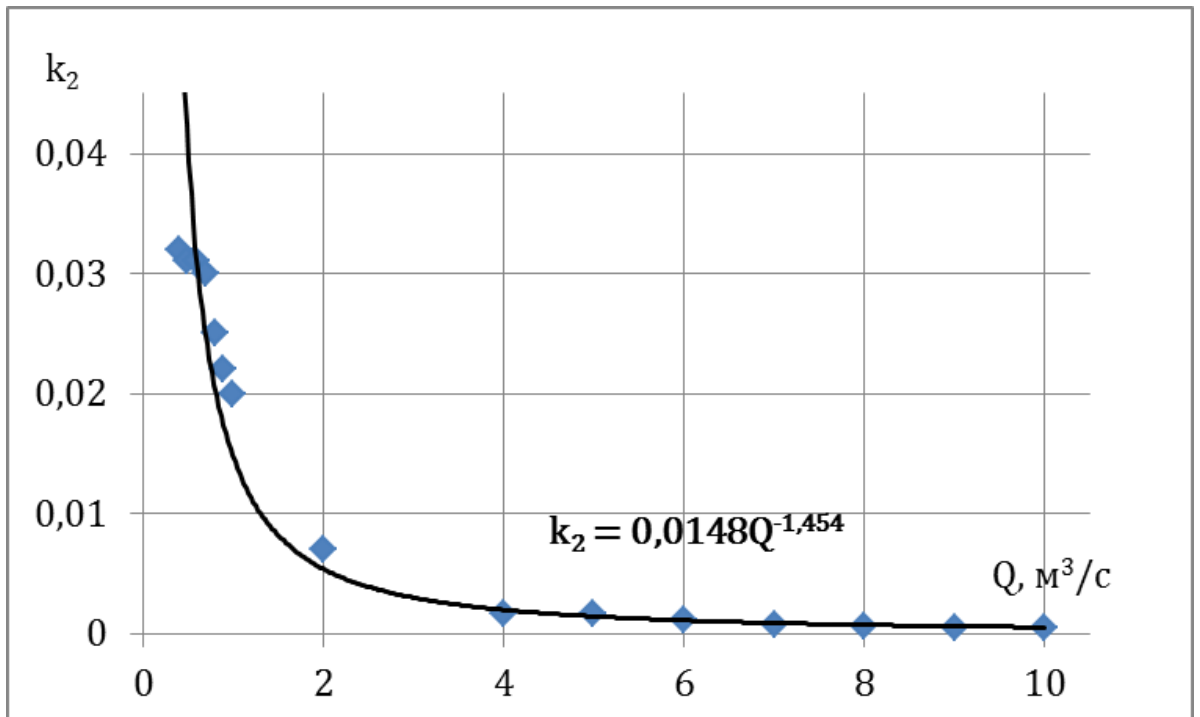


Рисунок 22. Коэффициент пропорциональности k_2 передаточной функции изменения концентрации метана в призабойном пространстве

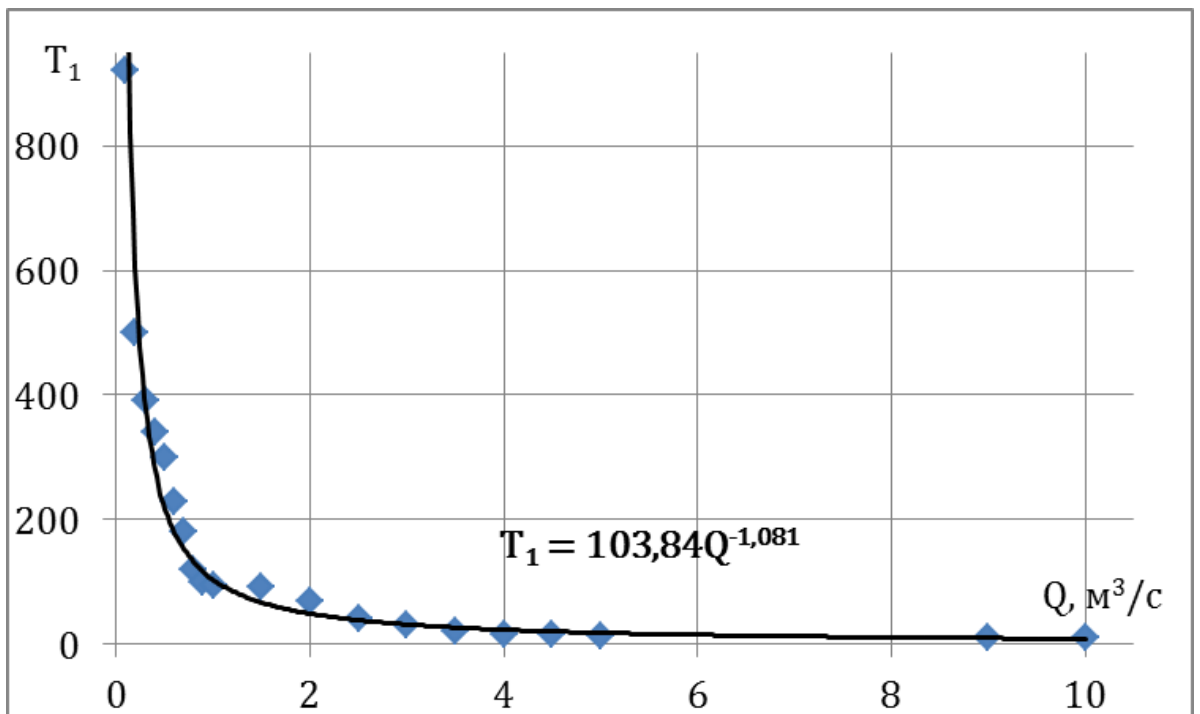


Рисунок 23. Постоянная времени T_1 передаточной функции изменения концентрации угарного газа в призабойном пространстве

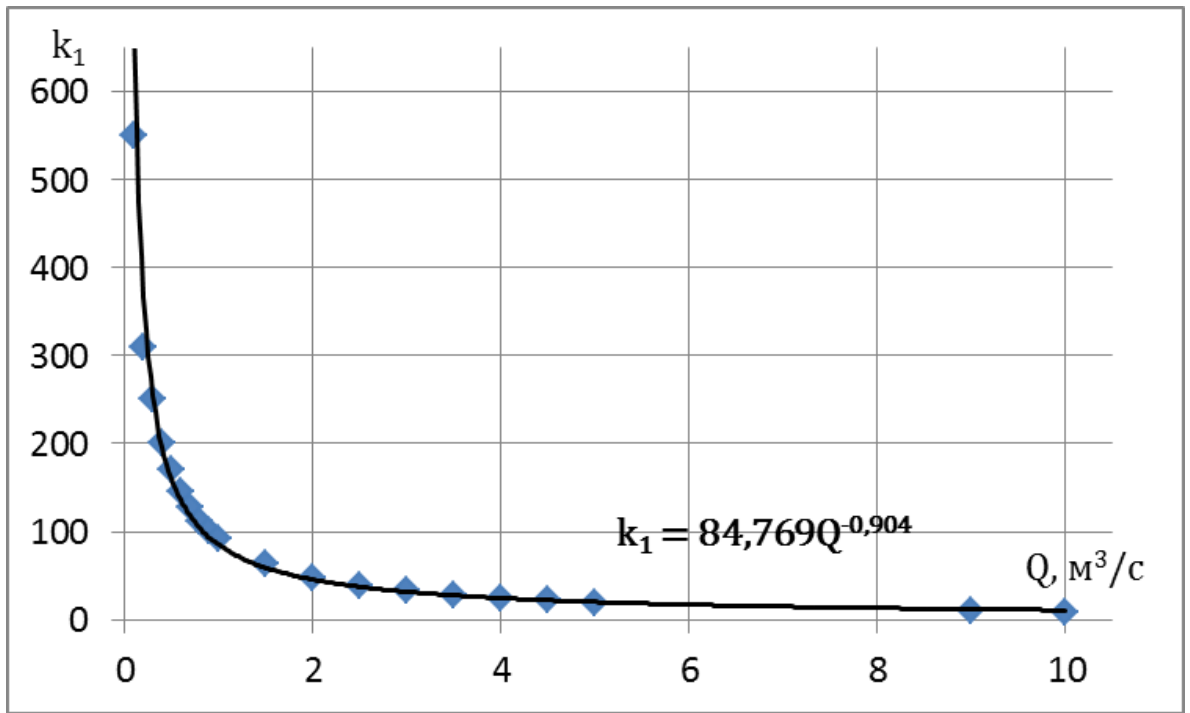


Рисунок 24. Коэффициент пропорциональности k_1 передаточной функции изменения концентрации угарного газа в призбойном пространстве

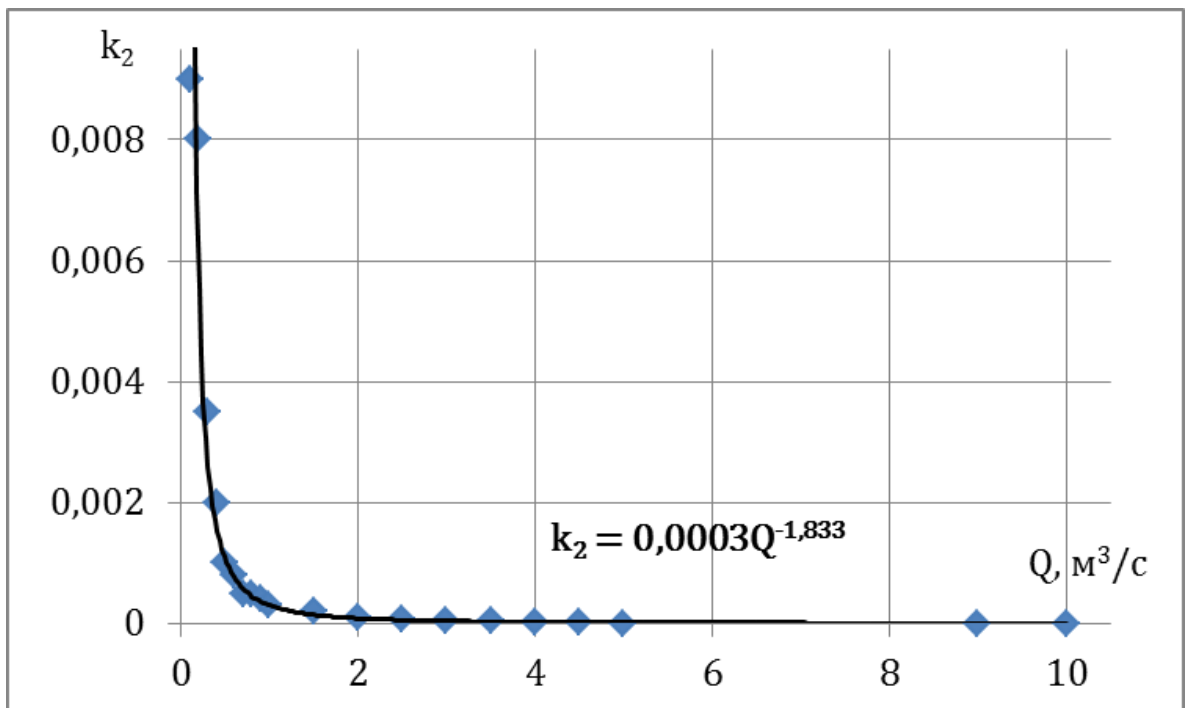


Рисунок 25. Коэффициент пропорциональности k_2 передаточной функции изменения концентрации угарного газа в призбойном пространстве

Для CO₂:

$$W_{\text{CO}_2}(p) = \frac{k_{1(\text{CO}_2)}}{T_{\text{CO}} 2 \cdot p + 1} + \frac{k_{2(\text{CO}_2)}}{p}, \quad (83)$$

где T_{CO} – постоянная времени, $k_{1(\text{CO})}$, $k_{2(\text{CO})}$ – коэффициенты усиления, а их зависимость от потока воздуха приведена на рисунках 26 -28.

Полученные в ходе идентификации параметры говорят о существенной нелинейности исследуемого объекта, необходимости применения адаптивной системы управления.

2.3 Настройка параметров регуляторов

По итогам идентификации рассмотренных объектов управления произведена настройка регуляторов на технический оптимум [141].

Передаточная функция контура регулирования расхода воздуха представлена уравнением (80), а сам контур имеет структуру, представленную на рисунке 7.

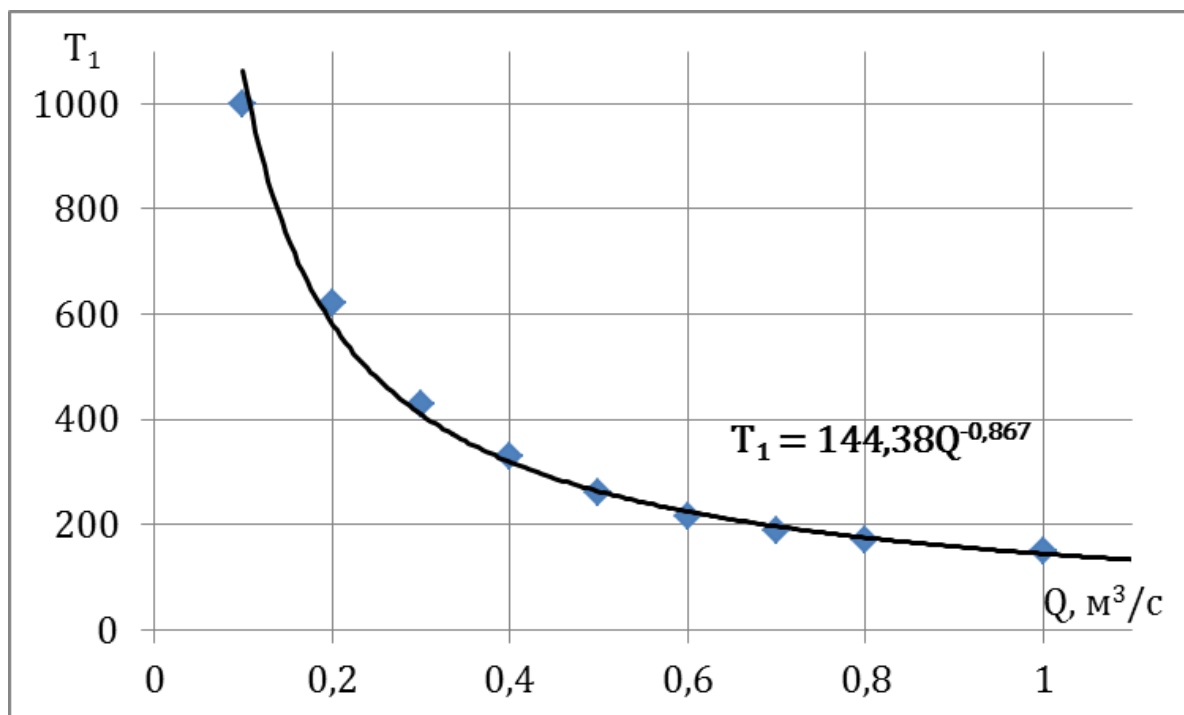


Рисунок 26. Постоянная времени T_1 передаточной функции изменения концентрации углекислого газа в призабойном пространстве

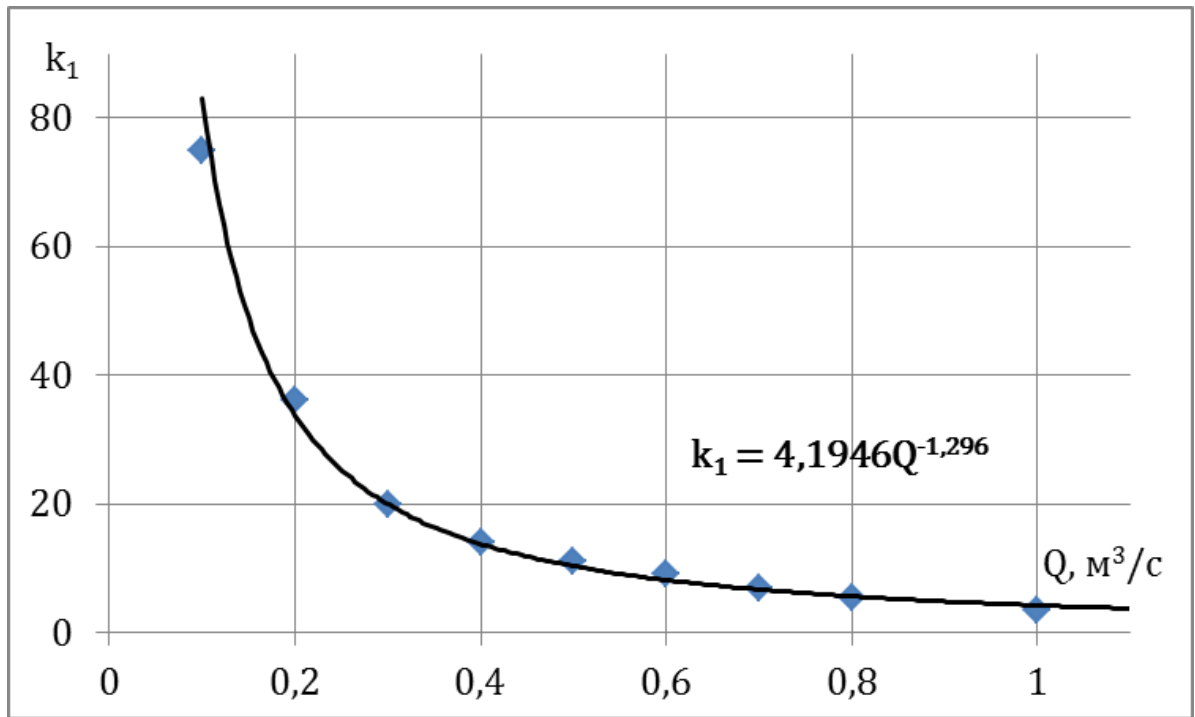


Рисунок 27. Коэффициент пропорциональности k_1 передаточной функции изменения концентрации углекислого газа в призабойном пространстве

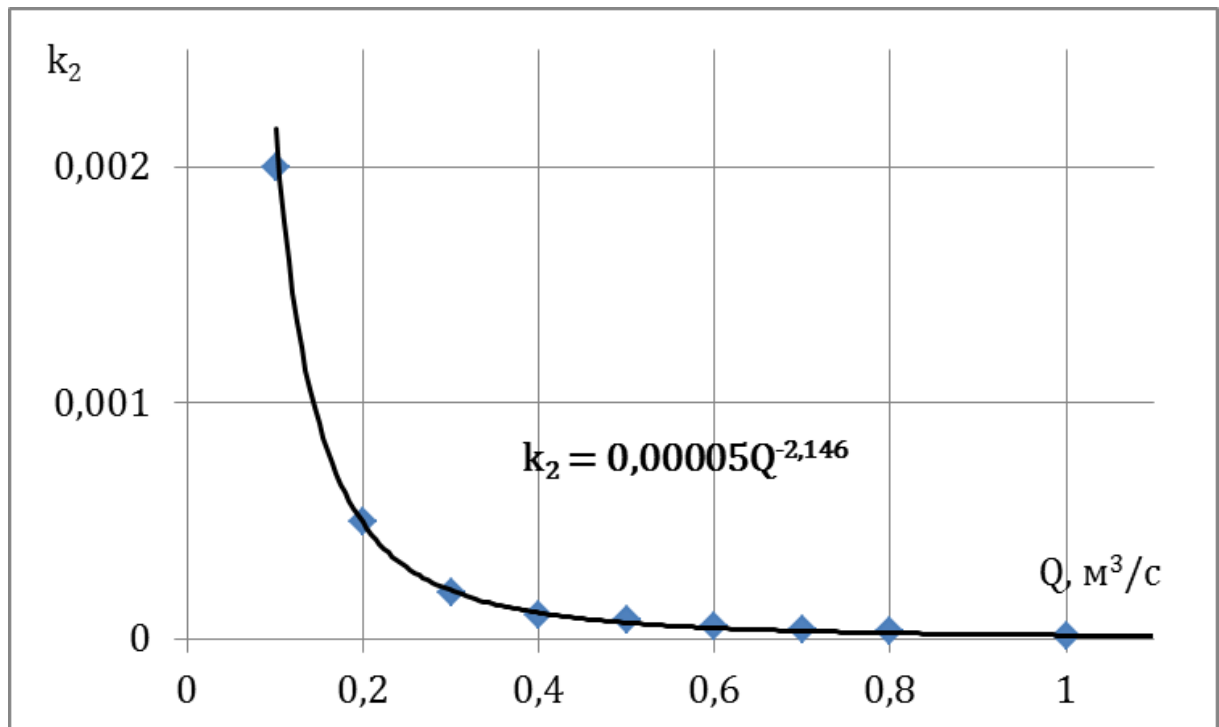


Рисунок 28. Коэффициент пропорциональности k_2 передаточной функции изменения концентрации углекислого газа в призабойном пространстве

Контур регулирования концентрации газов представлен передаточными функциями (81 - 82), структура изображена на рисунке 8.

В результате настройки регуляторов на технический оптимум получены адаптивные по управляющему воздействию регулятор потока воздуха $W_Q(p)$ и регуляторы $W_\Gamma(p)$ концентрации каждого вредного газа (CH_4 , CO и CO_2), структура которых формируется методом параметрирования стандартного промышленного ПИД регулятора с входным фильтром:

$$W_Q(p) = \frac{T_1 T_3 + T_2 T_3 + T_1 T_3}{kT} \cdot p + \frac{T_1 + T_2 + T_3}{kT} + \frac{1}{kT \cdot p}; \quad (84)$$

$$W_\Gamma(p) = \left(\frac{T_\Gamma}{k_{2(\Gamma)} T} \cdot p + \frac{1}{k_{2(\Gamma)} T} \right) \cdot \frac{1}{\frac{k_{1(\Gamma)} + k_{2(\Gamma)} \cdot T_\Gamma}{k_{2(\Gamma)}} \cdot p + 1}, \quad (85)$$

где T – выбранная инерционность регулятора.

2.4 Результаты и выводы

В данной главе предложено математическое описание системы вентиляции тупиковой выработки, позволяющее провести моделирование переходных процессов, настройку регуляторов.

1. Получены математические модели асинхронного электродвигателя, вентилятора, вентиляционной сети и тупиковой выработки.
2. Получены параметры передаточных функций исследуемых объектов.
3. Произведена настройка контуров регулирования на технический оптимум.

3 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для определения достоверности полученных выше предположений принято провести ряд вычислительных и практических экспериментов в следующей последовательности:

1. Вычислительный эксперимент по оценке различных способов запуска ВМП с точки зрения их энергоэффективности.

Позволит оценить энергетический эффект от применения ПЧ в электрическом приводе ВМП для плавного заполнения вентиляционной сети, даст качественную и количественную оценку процесса запуска вентилятора с точки зрения динамики переходных процессов.

2. Вычислительный эксперимент, позволяющий произвести анализ качества регулирования состава рудничной атмосферы предложенным в работе способом.

Должен подтвердить возможность автоматического регулирования содержания вредных примесей в воздухе выработки предложенным в работе способом.

3. Практический эксперимент на физической для проверки адекватности полученных результатов вычислительных экспериментов.

Эксперимент подтвердит адекватность математического аппарата и способ его получения, используемого в работе, а также докажет корректность предложенного метода регулирования параметров рудничной атмосферы.

3.1 Анализ энергетической эффективности

В начале была проведена оценка энергетической эффективности [140]. Для ее сравнения произведено моделирование способов запуска ВМП, рекомендованных ПБ.

ПБ предусматривают три способа запуска ВМП:

1. Прямой пуск.

2. Импульсный пуск.

3. Плавный пуск с помощью преобразователя частоты.

ПБ рекомендую производить импульсный пуск ВМП со следующими параметрами: число импульсов от 3 до 10 с длиной от 2 до 6 секунд, с интервалом между ними от 2 до 8 секунд. Плавное заполнение воздуховода с помощью частотного преобразователя осуществляется во временном интервале от 20 до 120 секунд [23].

Моделирование производилось в программной среде MatLab\Simulink. Программное средство представлено в приложении.

При моделировании использовались параметры запуска, обеспечивающие близкое по длительности заполнение воздуховода. Для плавного пуска время пуска задано 37 с, а для импульсного задана следующая длительность импульсов: 1 импульс – 1,5 с; 2 – 2 с; 3 – 3 с; 4 – 3 с; 5 – 3 с, интервал между импульсами – 6 с.

При рассмотрении вариантов частотного пуска целесообразно рассмотреть несколько законов частотного управления.

При этом плавный пуск при использовании ПЧ в работе реализован для законов частотного управления $U/f = const$ и $M_k(\omega)/M_c(\omega) = const$, где M_k – максимальный вращающий момент (критический момент) АД.

Расчет энергетической эффективности производился по методике, следующим образом:

Определялась мощность потерь в электрическом двигателе определяется как:

$$\Delta P_{\text{ов.}} = \Delta P_{\text{мех.}} + \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{с.}} \quad (86)$$

При этом мощность механических потерь определяется:

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{мех.ном}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^{3/2}, \quad (87)$$

где механические потери при номинальной частоте вращения:

$$\Delta P_{\text{мех.ном}} = \omega_n \cdot M_{\text{сн}}. \quad (88)$$

Потери в стали:

$$\Delta P_c = 0,2 \cdot P_n \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right). \quad (89)$$

Электрические потери:

$$P_{\text{э}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 + 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2. \quad (90)$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_{\text{мех.}}}{\Delta P_{\text{ов}}} = \frac{P_{\text{мех.}}}{\Delta P_c + \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{мех}}} \cdot 100\%, \quad (91)$$

где механическая мощность определяется:

$$P_{\text{мех.}} = \omega \cdot M_c. \quad (92)$$

Полная энергия:

$$W_{\text{полн.}} = \int_0^t P_{\text{полн}} dt. \quad (93)$$

Энергия потерь:

$$W_{\text{пот.}} = \int_0^t P_{\text{пот}} dt. \quad (94)$$

Результаты моделирования представлены на рисунках 29 – 34.

По графику $W_{\text{полн}}(t)$ рисунок 31 видно, что потребление электроэнергии при импульсном запуске ВМП (3) выше, чем при частотном (1, 2). Это связано с существенным повышением $\Delta P_{\text{потерь}}$, вызванным превышением токов АД над номинальным значением, характерным для прямого пуска и исключаемым для частотных способов (рисунок 32). В установившемся же режиме потребление электроэнергии происходит с одинаковой интенсивностью, т. к. полезная мощность во всех рассмотренных вариантах имеет близкое значение, поскольку система выходит на номинальный режим работы.

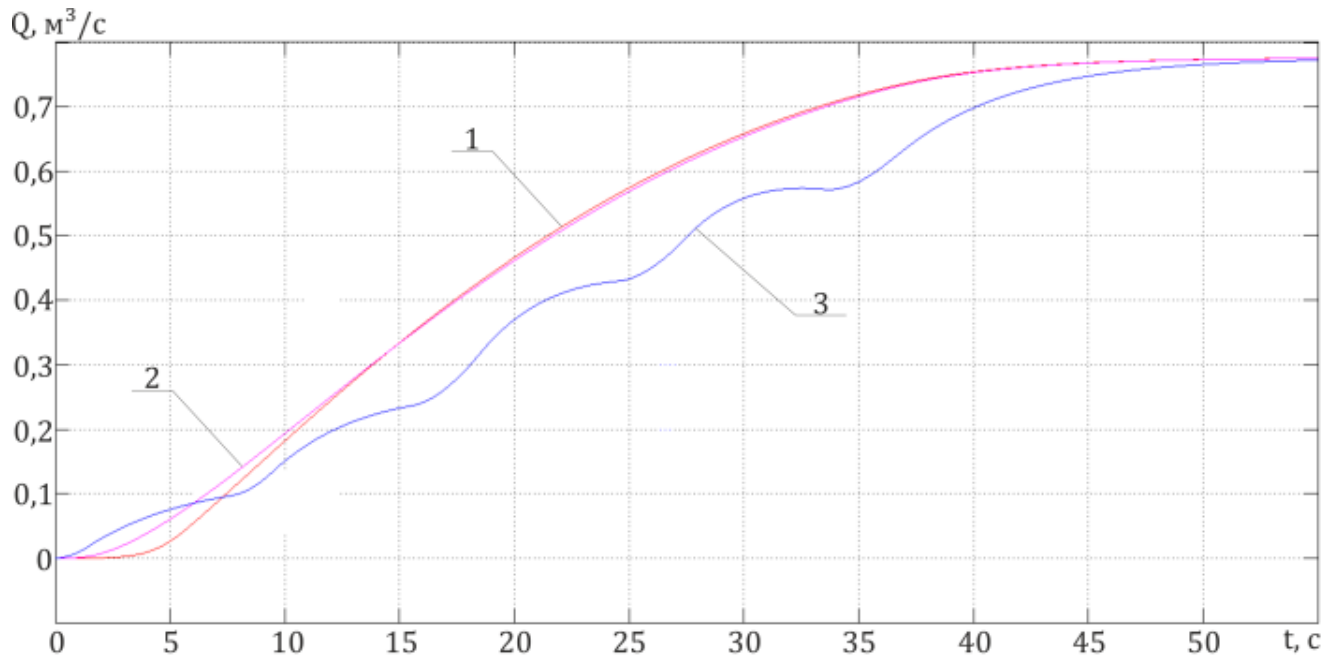


Рисунок 29. График переходного процесса $Q(t)$, 1 – $M_{\kappa}(\omega)/M_{\zeta}(\omega) = \text{const}$; 2 – $U/f = \text{const}$; 3 – импульсный пуск

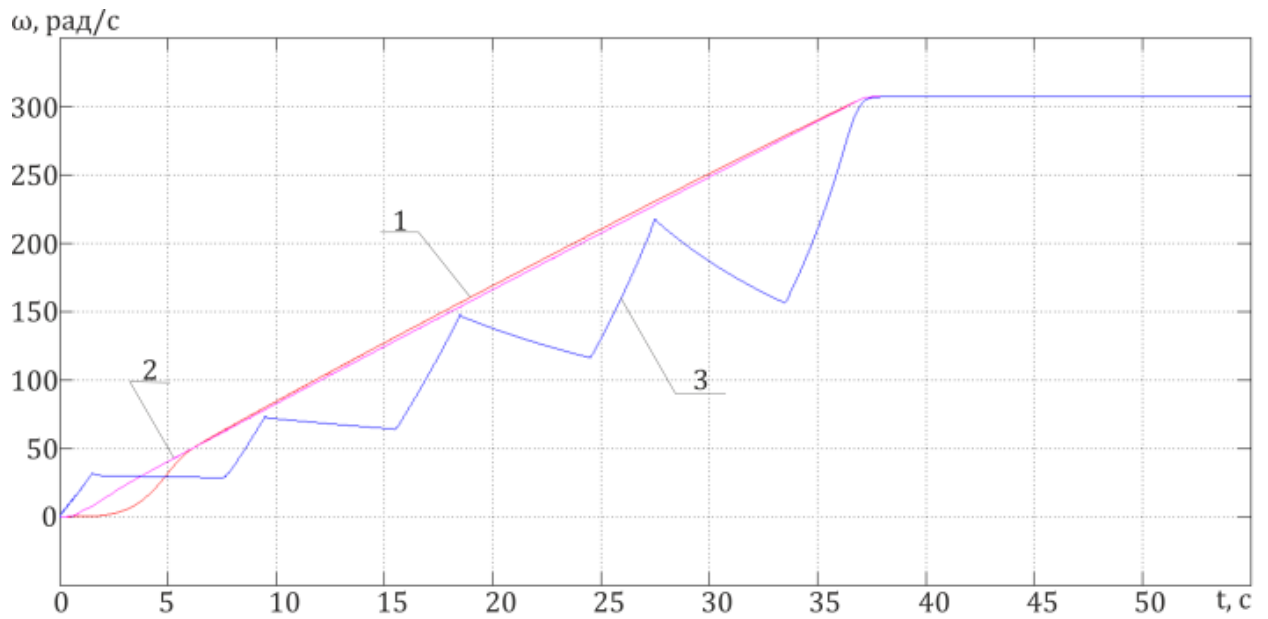


Рисунок 30. График переходного процесса $\omega(t)$, 1 – $M_{\kappa}(\omega)/M_{\zeta}(\omega) = \text{const}$; 2 – $U/f = \text{const}$; 3 – импульсный пуск

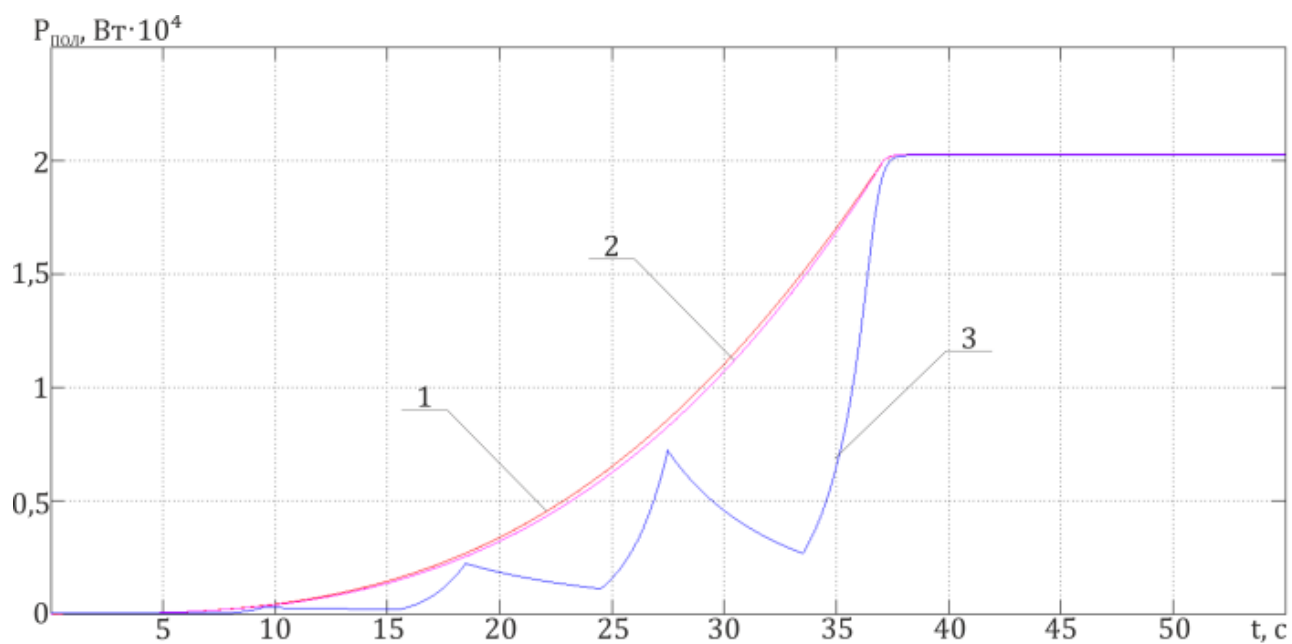


Рисунок 31. График изменения полезной мощности $P_{пол}(t)$, 1 – $M_K(\omega)/M_C(\omega) = const$; 2 – $U/f = const$; 3 – импульсный пуск

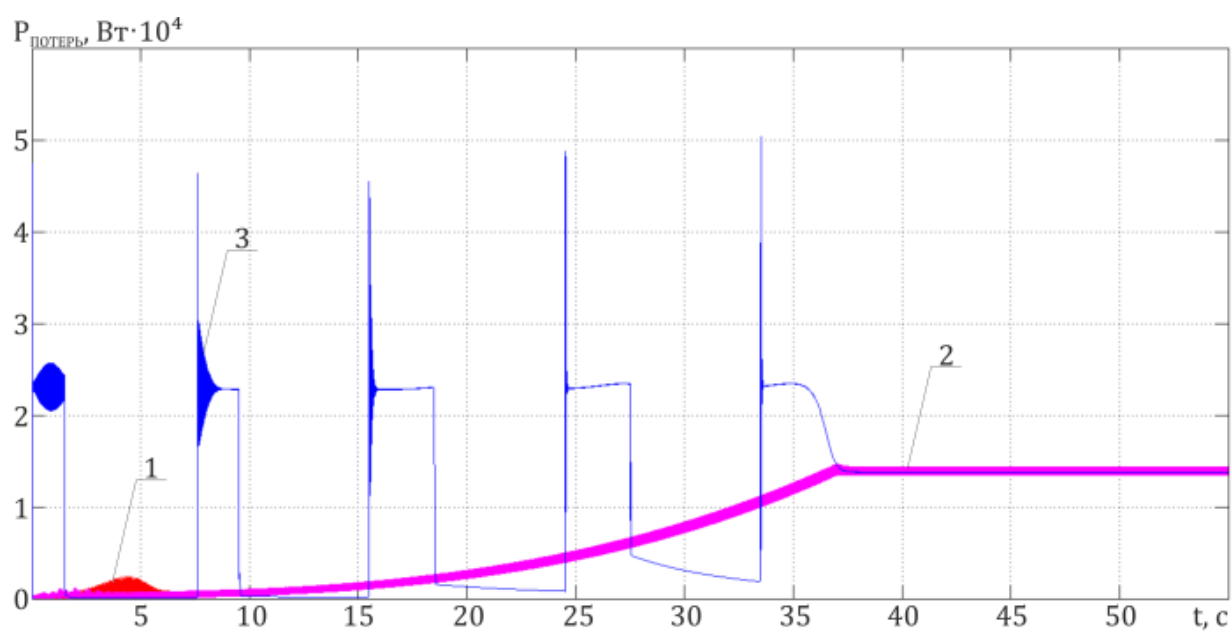


Рисунок 32. График переходного процесса $P_{потерь}(t)$, 1 – $M_K(\omega)/M_C(\omega) = const$; 2 – $U/f = const$; 3 – импульсный пуск

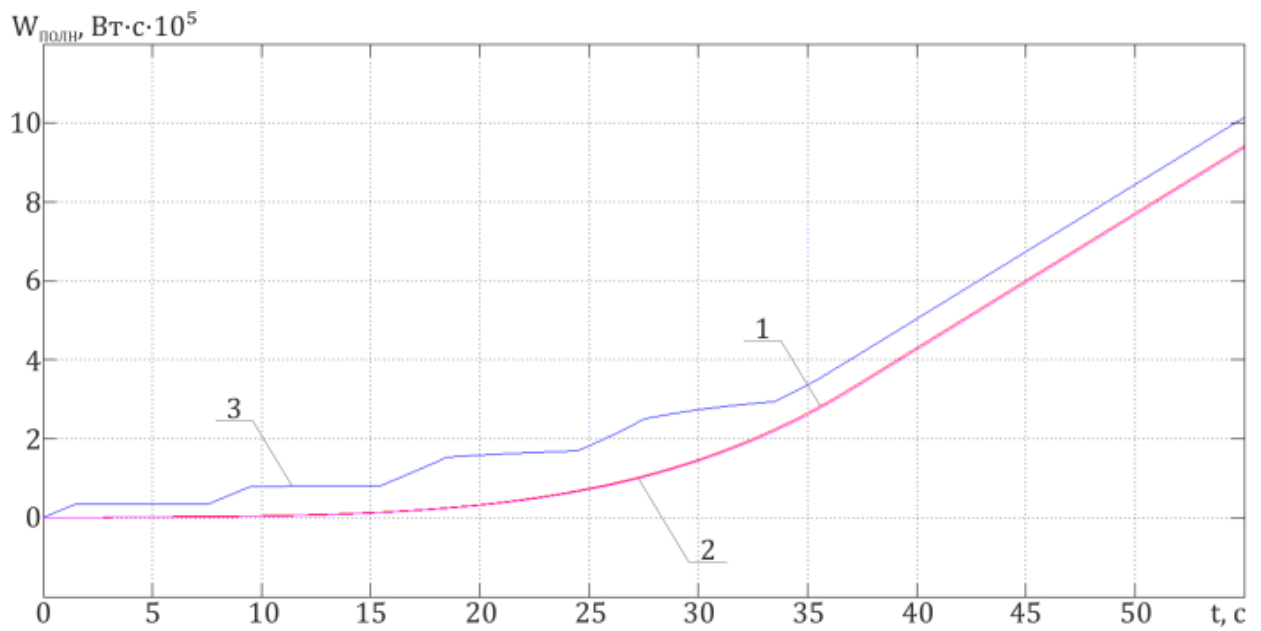


Рисунок 33. График переходного процесса $W_{\text{полн}}(t)$, 1 – $M_{\text{к}}(\omega)/M_{\text{с}}(\omega) = \text{const}$; 2 – $U/f = \text{const}$; 3 – импульсный пуск

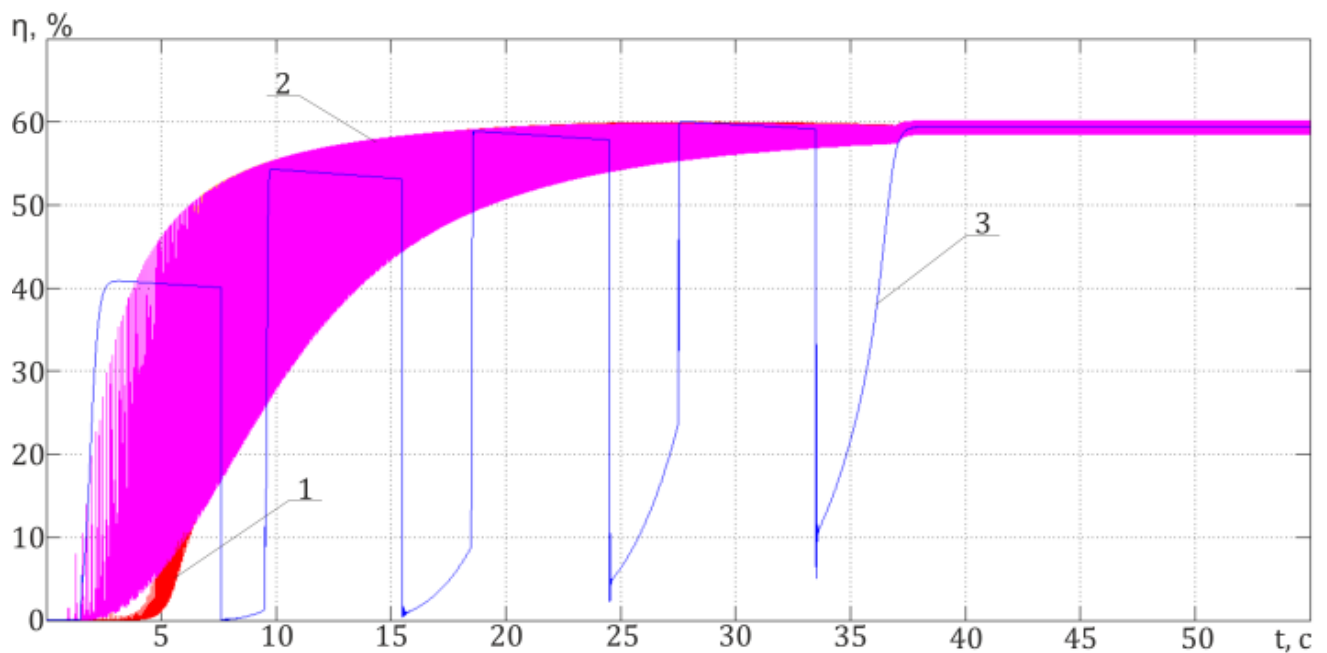


Рисунок 34. График изменения КПД двигателя во время пуска, $\eta(t)$, 1 – $M_{\text{к}}(\omega)/M_{\text{с}}(\omega) = \text{const}$; 2 – $U/f = \text{const}$; 3 – импульсный пуск

Полезная энергия при частотных способах выше, так как на низких угловых скоростях момент сопротивления невелик и увеличивается по мере разгона, а законы частотного управления обеспечивают со-

образное повышение амплитуды напряжения, подводимого к двигателю, тогда как при импульсном пуске к двигателю всегда подводится напряжение номинальной величины. Это же подтверждается стабильно более высоким КПД при частотном пуске (рисунок 34).

Рассмотренные варианты частотного запуска ВМП обладают близкими энергетическими характеристиками. Однако следует отметить, что в общем случае для вентиляторной нагрузки закон частотного управления $U/f = \text{const}$ формирует несколько больший электромагнитный момент на низких угловых скоростях, чем это требуется для преодоления момента сопротивления.

Аэродинамические характеристики вентилятора были аппроксимированы, и по ним построены зависимости мощности вентилятора от его производительности, регулировочные характеристики вентилятора, а также предельные режимы работы вентилятора.

Таблица 11. Численные значения параметров работы вентилятора

Параметр, значение, единицы измерения				
Напор Н, Па	Подача Q, м ³ /с	Потребляе- мая мощ- ность N, Вт	КПД	Момент со- противле- ния Мс, Н·м
930	9,2	22000	0,18	71,90247
1250	9	22600	0,42	73,86345
2150	8	23200	0,72	75,82443
2500	7,2	23400	0,77	76,47809
2800	6	22000	0,76	71,90247
2980	5	21000	0,68	68,63418
3120	4	20400	0,522	66,6732
3180	3	19200	0,18	62,75125

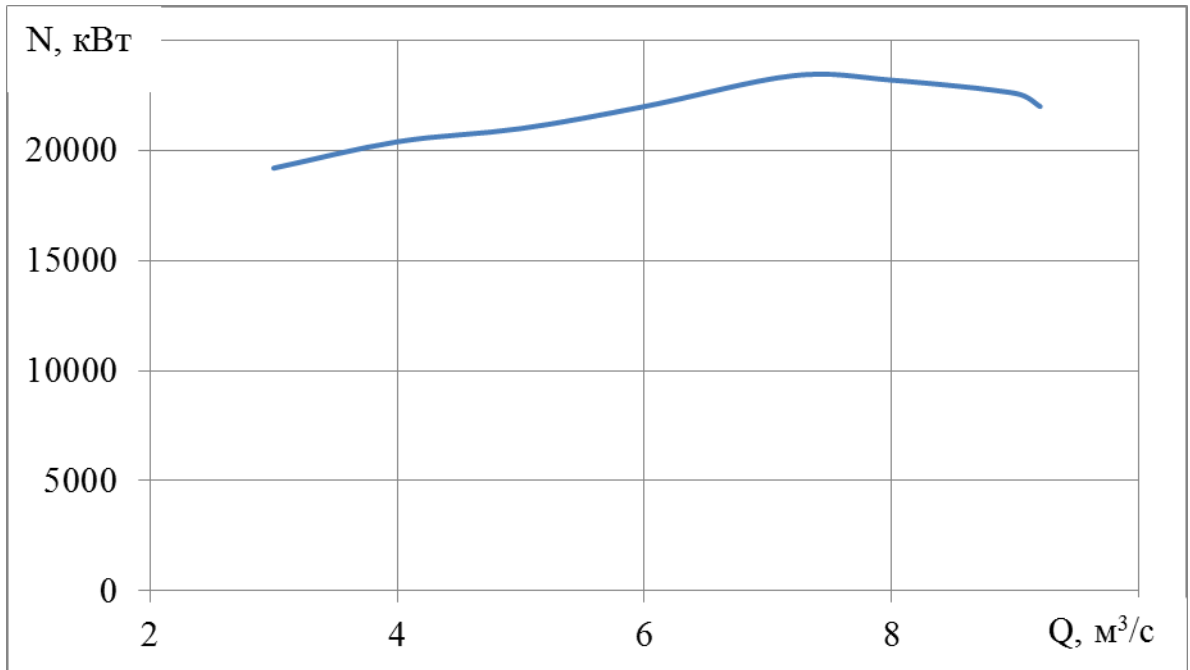


Рисунок 35. График потребляемой мощности в зависимости от подачи вентилятора.

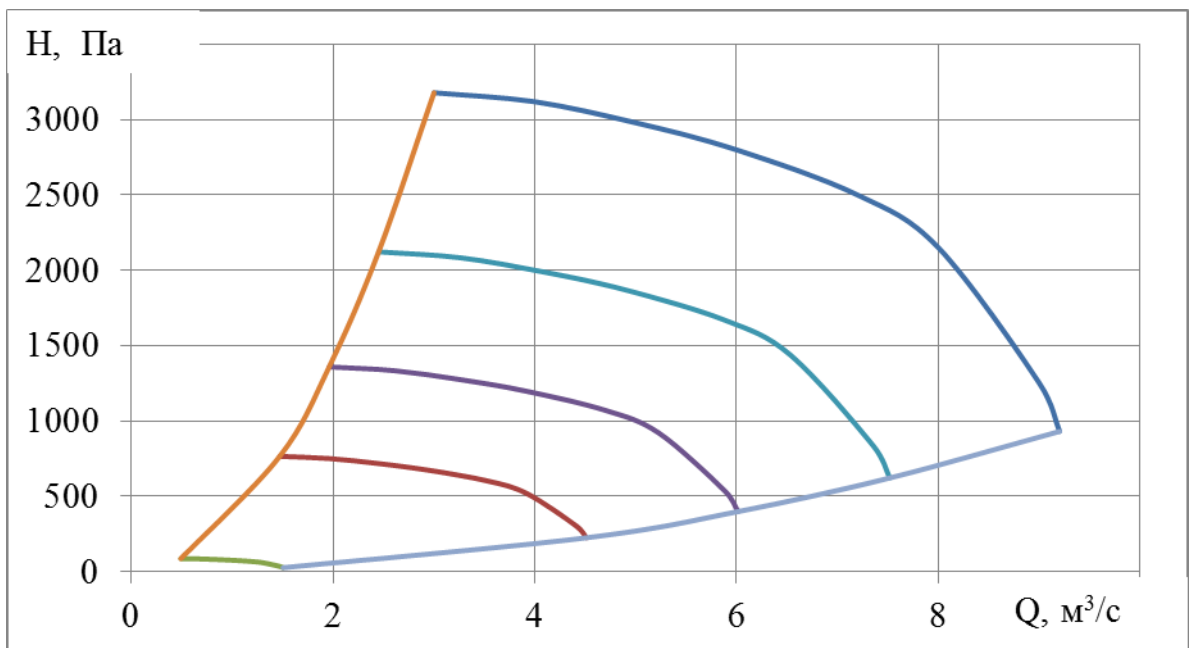


Рисунок 36. Регулировочные характеристики вентилятора ВМЭ-6, предельные характеристики вентиляционных сетей

Анализ энергопотребления при различных характеристиках вентиляционной сети и режимах работы ВМП показал, что потребляемая во время работы энергия изменяется в пределах от 36,7 до 27,9 кВт.

Таблица 12. Численные значения параметров работы вентилятора в нормальном режиме

Параметр, значение, единицы измерения				
Напор Н, Па	Подача Q, м ³ /с	Частота вращения ω , рад/с	Потребляе- мая мощ- ность N, Вт	Момент со- противления Мс, Н·м
3180	3	305,97	19200	62,75125
2122,997	2,451221	250	10473,33	41,89331
1358,718	1,960977	200	5362,344	26,81172
764,279	1,470732	150	2262,239	15,08159
84,91989	0,490244	50	83,78663	1,675733
-	-	0	-	0

Таблица 13 Численные значения параметров работы вентилятора в пониженном режиме.

Параметр, значение, единицы измерения				
Напор Н, Па	Подача Q, м ³ /с	Частота вращения ω , рад/с	Потребляемая мощность N, Вт	Момент со- противления Мс, Н·м
620,8766	7,517077	250	12000,69	48,00275
397,361	6,013661	200	6144,353	30,72176
223,5156	4,510246	150	2592,149	17,28099
24,83506	1,503415	50	96,00551	1,92011
-	-	0	-	0

При нормальном режиме возможно снизить потребление электроэнергии на 2,5 кВт путем исключения из вентиляционной сети дополнительных сопротивлений, то есть отказ от регулирования производительности вентилятора путем дросселирования, в пониженном режиме работы снижение сопротивления вентиляционной сети позволит получить максимальную экономию потребляемой электроэнергии 1,8 кВт.

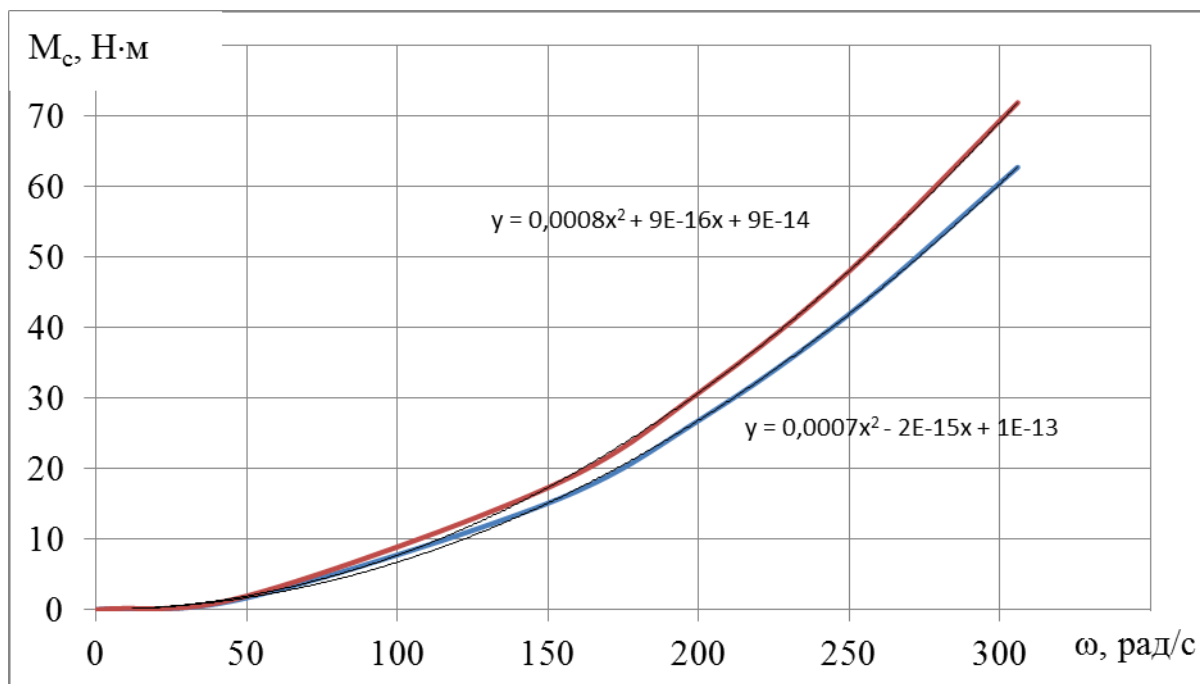


Рисунок 37. Зависимости M_c на валу двигателя от частоты вращения для нормального и пониженного режимов работы вентилятора

. Следует отметить, что общий уровень энергопотребления в существенно более широких пределах меняется при регулировании производительности вентилятора различными способами. Так, при работе с номинальной производительностью в пониженном режиме потребление электроэнергии на 8,8 кВт ниже, чем при работе с той же производительностью в нормальном режиме. А при работе с минимальной подачей, полученной путем регулирования производительности ВМП дросселированием, потребление электроэнергии составляет 19,2 кВт, в то же время, если регулировать производительность с помощью ПЧ,

потребление энергии будет 2,75 кВт, что дает существенную экономию, равную примерно 158 000 руб. в год.

3.2 Анализ качества регулирования состава рудничной атмосферы

На следующем этапе для анализа эффективности работы предложенной системы автоматизированного управления ВМП и правильности настройки регуляторов было проведено моделирование работы системы частотного регулирования производительностью ВМП с целью поддержания концентрации опасных газов в тупиковой выработке в допустимых пределах.

В среде MatLab\Simulink была создана система регулирования параметров рудничной атмосферы, концепция которой была предложена в работе ранее. Программное средство представлено в приложении 3.

Система автоматического регулирования параметров рудничной атмосферы состоит из внешнего контура регулирования расхода воздуха в выработке и внутреннего контура регулирования концентраций вредных примесей [147]. При моделировании в качестве вредных газов рассматривались примеси метана, углекислого и угарного газов. Моделирование производилось для плавного пуска и последующего поддержания концентраций вредных газов в допустимых пределах. Результаты представлены на рисунке 38

В модели параметры горной выработки и вентилятора соответствуют тем, что рассчитаны в п. 2.2.2. Расчет параметров модели.

Вычислительный эксперимент производился со следующими допущениями:

1. В качестве источника вредных примесей в выработке рассматривается генератор случайных чисел, с вероятностью значений, численно равных концентрации газов, равной метаматематическому ожиданию от удельной газоносности пласта.

2. Перемешивание происходит мгновенно в объеме, ограниченном с одной стороны грудью забоя, с другой стороны плоскостью, параллельной забою, касающейся края вентиляционного трубопровода.

3. Плотность воздуха остается постоянной и не зависит от подачи в забой, а также температуры.

В ходе моделирования установлено, что по окончании запуска ВМП, концентрация ни по одному из газов C_G не превысила dC_G^* , что позволяет сделать вывод об эффективности предлагаемой САУ. Заниженное относительно одной трети от dC_G^* значение концентраций опасных газов объясняется ограничением снизу величины $Q_{ВЫХ}^*$ для обеспечения требуемой минимальной скорости воздушного потока в выработке $V_{ВЫХ}$. Тем не менее, производительность вентилятора даже в этом режиме оказывается ниже номинальной, что свидетельствует об экономии электроэнергии, потенциально возникающей при внедрении предлагаемой САУ электроприводом ВМП.

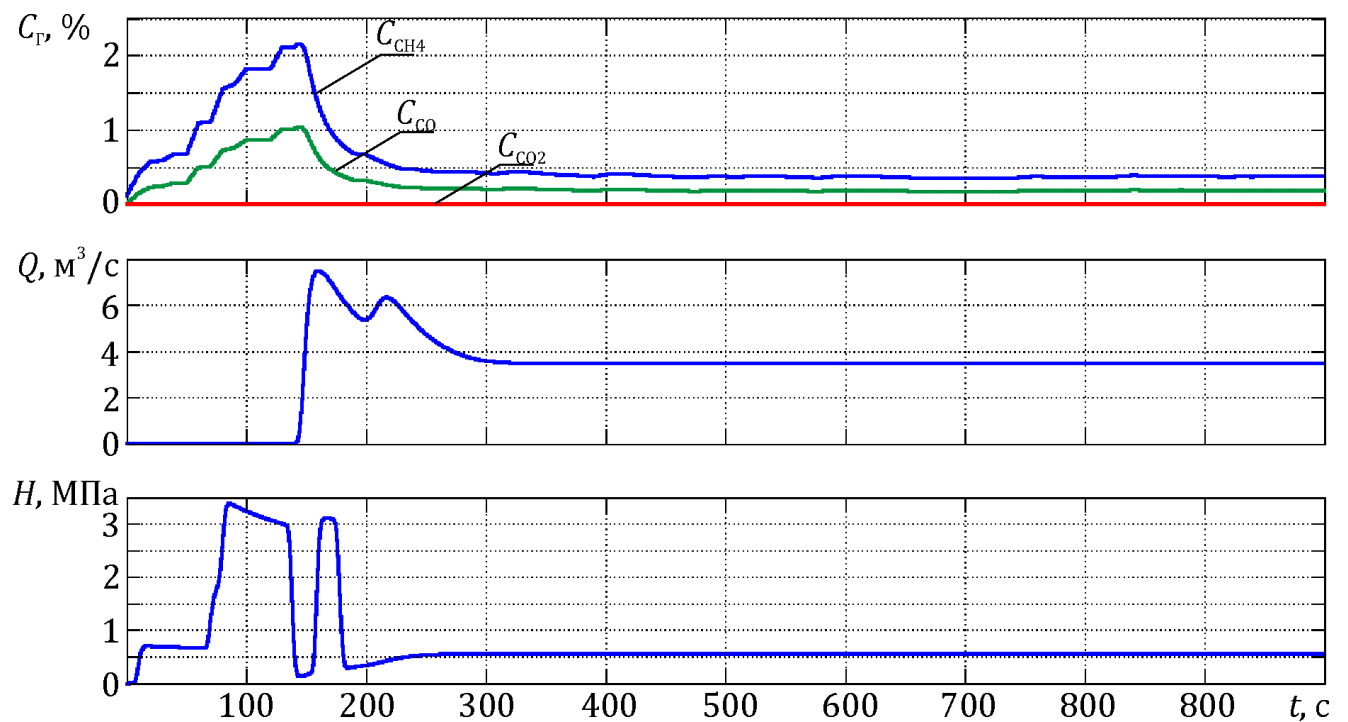


Рисунок 38. Результаты моделирования работы САУ ВМП

3.3 Экспериментальные исследования

Для проверки адекватности математической модели и определения степени достоверности полученных результатов моделирования был произведен физический эксперимент [142]. Экспериментальные исследования выполнялись на физической модели вентиляционной системы, в качестве которой использовалась установка для проверки измерителей массовой концентрации пыли и скорости воздушного потока УПП-1 производства «ВостЭКО» по технической документации экспериментального завода «ВостНИИ».

Принцип действия установки УПП-1 основан на создании стационарного пылегазового потока и последующем определении массовой концентрации пыли по гравиметрической методике, включающей отбор и осаждение пылегазовой пробы на аналитические фильтры и создании стационарного воздушного потока различных скоростей при проверке измерителей скорости воздушного потока.

В состав УПП – 1 входит следующее оборудование:

- замкнутая камера.
- дозатор сыпучих веществ для создания аэрозолей в камере.
- радиальный вентилятор ВР 80 – 75 №5 исп. 1.
- преобразователь частоты Schneider Electric ATV312HU30N4 для регулирования производительности вентилятора.
- пылеулавливающая установка ПУ – 1800.

Основные характеристики УПП-1 приведены в таблице

Таблица 14. Основные характеристики установки УПП-1

Характеристика, единицы измерения	Значение
Диапазон измерения массовой концентрации пыли, мг/м ³	0,1-2000
Диапазон измерения скорости воздушного потока, м/с	0-20

Характеристика, единицы измерения	Значение
Пределы допускаемой относительной погрешности установки при измерении массовой концентрации, %	± 12
Пределы допускаемой основной относительной погрешности установки при измерении скорости, %	$\pm 2 \times \left(\frac{1}{V_{\text{ВЫХ}}} + 5 \right)$
Тип электропривода вентилятора	Регулируемый с ПЧ
Потребляемая мощность, не более, кВт	18

Характеристики оборудования, входящего в состав УПП-1 приведены в таблице 18 – 19.

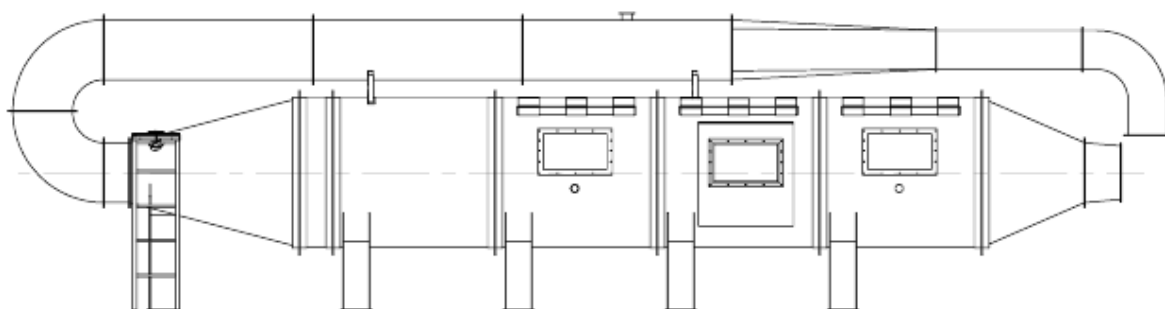


Рисунок 39. Внешний вид установки УПП-1

Таблица 15. Основные характеристики преобразователя частоты
ATV312HU30N4

Характеристика	Значение
Мощность двигателя, кВт	3 кВт
[Us] номинальное напряжение питания	380...500 V (- 15...10 %)
Частота сети питания	50...60 Hz (- 5...5 %)
Число фаз сети	3 фазы
Линейный ток	10.9 А для 380 V, 5 кА

Характеристика	Значение
	8.3 А для 500 V
Фильтр помех	Встроенный
Полная мощность	7.1 кВт·А
Макс. переходной ток	10.7 А для 60 с
Рассеиваемая мощность, Вт	125 Вт при номинальной нагрузке
Диапазон скоростей	1...50
Профиль управления асинхронным электродвигателем	Заводская настройка: постоянный момент. Бездатчиковое векторное управление двигателем с помощью сигнала ШИМ
Электрическое соединение	Al1, Al2, Al3, AOV, AOC, R1A, R1B, R1C, R2A, R2B, LI1...LI6 зажим 2.5 мм ² AWG 14
Питание	Внутреннее питание для регулирующего потенциометра (2,2 - 10 кОм) при 10...10,8 В ≤ 10 мА для защита от перегрузки и короткого замыкания
Протокол порта обмена данными	CANopen Modbus
Степень защиты IP	IP41 на верхней части IP31 на верхней части IP20 на верхней части без закрывающей пластины
Опциональная карта	Profibus DP коммуникационная карта Modbus TCP коммуникационная карта DeviceNet коммуникационная карта Шлейф CANopen коммуникационная карта

Характеристика	Значение
Пределы напряжения питания	323...550 В
Пределы частоты сети	47.5...63 Гц
Предполагаемый линейный I _{sc}	5 кА
Непрерывный выходной ток	7.1 А при 4 кГц
Выходная частота привода	0...500 Гц
Номинальн. частота коммутации	4 кГц
Переходная перегрузка по вращающему моменту	170...200 % от номинального крутящего момента электродвигателя
Тормозной момент	30 % без тормозного резистора 100 % с тормозным резистором постоянно
Контур регулирования	ПИ регулятор частоты
Компенсация проскальзывания вала двигателя	Регулируем. Автоматически при любой нагрузке Подавляемый
Выходное напряжение	<= напряжение питания
Момент затяжки	0.6 Н-м AI1, AI2, AI3, AOV, AOC, R1A, R1B, R1C, R2A, R2B, LI1...LI6
Изоляция	Между цепями питания и управления
Номер аналогового входа	3
Тип аналогового входа	AI3 задаваемый ток 0...20 mA, полное сопротивление 250 Ом AI1 задаваем. напряжение 0...10 V, входное напряжение 30 В макс., полное сопротивление 30000 Ом
Длительность выборки	AI1, AI2, AI3 8 мс для аналоговый
Время отклика	R1A, R1B, R1C, R2A, R2B 8 ms для

Характеристика	Значение
	дискретный
Ошибка линеаризации	+/- 0,2 % для выход
Номер аналогового выхода	2
Тип аналогового выхода	АОС задаваемый ток 0...20 mA, полное сопротивление 800 Ом, разрешение 8 бит
Тип дискретных входов	(LI1...LI6) положительная логика (источник) состояние $0 < 5$ В состояние $1 > 11$ В (LI1...LI4) логический вход не подсоединен состояние $1 < 13$ В
Количество дискретных выходов	2
Тип дискретного выхода	(R1A, R1B, R1C) задаваем. релейная логика 1 Н.О. + 1 Н.З., электрическая устойчивость 100000 циклы
Минимальный коммутируемый ток	R1-R2 10 mA при 5 V пост. ток
Макс. коммутируемый ток	R1-R2 вкл. резистивные нагрузка, 5 A при 250 V пер. ток, $\cos \phi = 1$, L/R = 0 мс R1-R2 вкл. индуктивн. нагрузка, 2 A при 30 V пост. ток, $\cos \phi = 0,4$, L/R = 7 мс
Количество дискретных входов	6
Тип дискретного входа	(LI1...LI6) программируемый, 24 V 0...100 mA с PLC, полное сопротивление 3500 Ом

Характеристика	Значение
Программы ускорения и замедления	Линейн., задается отдельно, от 0,1 до 999,9 с S, U или по выбранный заказчиком
Торможение до остановки	Подачей пост, тока
Тип защиты	Короткое замыкание между фазами двигателя привод Защита от перегрева привод Исчезновения фаз двигателя привод Функция защиты от значительного уменьшения напряжения 3-фазного питания привод Исчезновение фазы на входе привод
Сопротивление изоляции	≥ 500 мОм при 500 В пост. тока в течение 1 минуты
Сигнализация	1 светодиод красный для напряжение привода
Разрешение по частоте	Дисплейный блок 0,1 Гц Аналоговый вход 0,1...100 Гц
Тип разъема	1 RJ45 Modbus/CANopen
Физический интерфейс	RS485 многоточечная последовательная линия
Кадр передачи	RTU
Скорость передачи	10, 20, 50, 125, 250, 500 Кбит/с или 1 Мбит/с CANopen
Кол-во адресов	1...247 Modbus
Кол-во приводов	127 CANopen
С маркировкой	CE
Электромагнитная совмести-	Испытание стойкости к с электроли-

Характеристика	Значение
мосьть	тическому разряду соответствующий IEC 61000-4-2 уровень 3 Испытание на невосприимчивость к коммутационным помехам/коротким пакетам соответствующий IEC 61000-4-4 уровень 4
Стандарты	IEC 61800-3 IEC 61800-5-1
Сертификаты продуктов	CSA C-Tick DNV GOST NOM UL
Степень загрязнения	2
Защитное исполнение	TC
Виброустойчивость	1,5 мм ($f = 3 \dots 13$ Гц) соответствующий EN/IEC 60068-2-6 1 gn ($f = 13 \dots 150$ Гц) соответствующий EN/IEC 60068-2-6
Ударопрочность	15 gn для 11 мс соответствующий EN/IEC 60068-2-27
Относительная влажность	5...95 % без падения капель воды соответствующий IEC 60068-2-3 5...95 % без образования конденсата соответствующий IEC 60068-2-3
Температура окружающего воздуха при хранении	-25...70 °C

Характеристика	Значение
Температура окружающей среды при работе	-10...60 °С с понижающим коэффициентом без защитной крышки сверху привода
Рабочая высота над уровнем моря	<= 1000 м без ухудшения номинальных значений
Рабочее положение	Вертикальный +/- 10 градусов
Внешний размер	184 x 140 x 150 mm 215 x 185 x 158 mm 402 x 239 x 192 mm
Высота	184 мм
Ширина	142 мм
Глубина	152 мм
Масса продукта	3.1 кг

Таблица 16. Технические характеристики вентилятора ВР 80-75

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
Номинальная подача, $10^3 \cdot \text{м}^3/\text{час}$	4,3-5,6
Номинальное полное давление, Па	810-500
Максимальный полный КПД вентилятора, %	68
Электродвигатель	АИР90L4
мощность, кВт	2,2
напряжение, В	220/380
частота вращения, об/мин	1500
частота сети, Гц	50
Масса комплекта, кг	101

$D=D_{\text{ном}}$

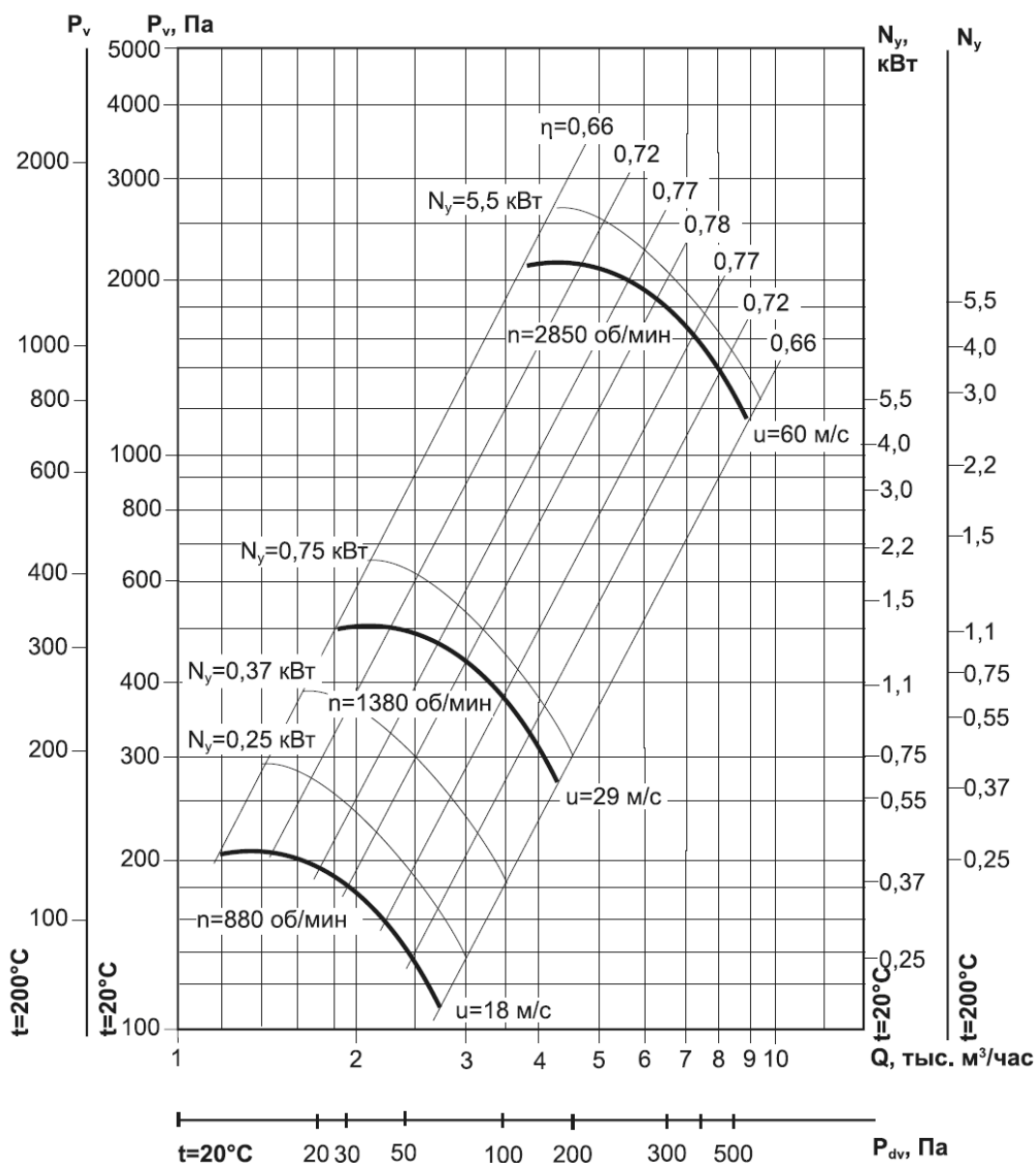


Рисунок 40. Аэродинамические характеристики вентилятора
ВР 80-75 №5 исп-1

Таблица 17. Технические характеристики ТТМ

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
Диапазон измерения скорости воздушного потока, м/с	0,1 – 30
Диапазон индикации скорости воздушного потока, м/с	0,01 – 0,1
Погрешности измерения скорости воздушного	$\pm(0,05+0,05V)$, где

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
потока, м/с, не более	V - измеренная скорость потока
Длительность непрерывной работы без подзарядки аккумуляторов, часов, не менее	8
Напряжение питания термоанемометра, В	4,8
Потребляемая термоанемометром мощность, Вт, не более	0,5
Цифровой интерфейс связи	RS-232
Длина линии связи RS-232, м, не более	15
Рабочие условия измерительного блока термоанемометра -температура воздуха, °С -относительная влажность, % -атмосферное давление, кПа	от -20 до +50 от 10 до 95 от 84 до 106
Рабочие условия измерительного зонда термоанемометра -температура воздуха, °С -относительная влажность, % -атмосферное давление, кПа	от -40 до +50 от 10 до 95 от 84 до 106
Рабочие условия соединительных кабелей -температура воздуха, °С -относительная влажность, % -атмосферное давление, кПа	от -40 до +60 от 10 до 95 от 84 до 106
Габаритные размеры измерительного блока, мм, не более	190×90×40
Габаритные размеры измерительного зонда, мм, не более	Ø13×360
Масса измерительного блока без зонда, кг, не	0,3

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
более	
Масса измерительного зонда, кг, не более	0,1
Средний срок службы, лет, не менее	5

При проведении эксперимента настройка преобразователя производилась с помощью программного обеспечения SoMove Lite от производителя ПЧ Schneider Electric, а управление установкой и визуализация информации о ее работе выполнялись с помощью персонального компьютера куда поступали данные с интерфейса связи RS-232 от термоанемометра в исполнении ТТМ-2-01 и откуда после обработки с помощью специально написанной программы, программное представлено приложение 3, данные передавались на аналогичный интерфейс связи преобразователя частоты.

Поскольку установка УПП-1 имитирует особенности функционирования систем вентиляции тупиковых выработок только частично, основной целью экспериментальных исследований было подтверждение адекватности используемой компьютерной модели. Для этого был выбран режим работы предлагаемой САУ с разомкнутым внешним контуром и постоянным значением $Q_{\text{вых}}^*$ ступенчато задаваемым в начале эксперимента.

Настройка параметров регуляторов производилась по методике указанной выше, параметры регулятора представлены в таблице.

Таблица 18.

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
Заданное значение подачи вентилятора Q^* , м ³ /с	2
Коэффициент пропорциональности k_p	57,8
Коэффициент интегрирования k_i	5,94
Постоянная времени T_m , с	150

Переходные процессы потока воздуха полученные для физической и компьютерной модели показаны на рисунках 41 и 42 соответственно.

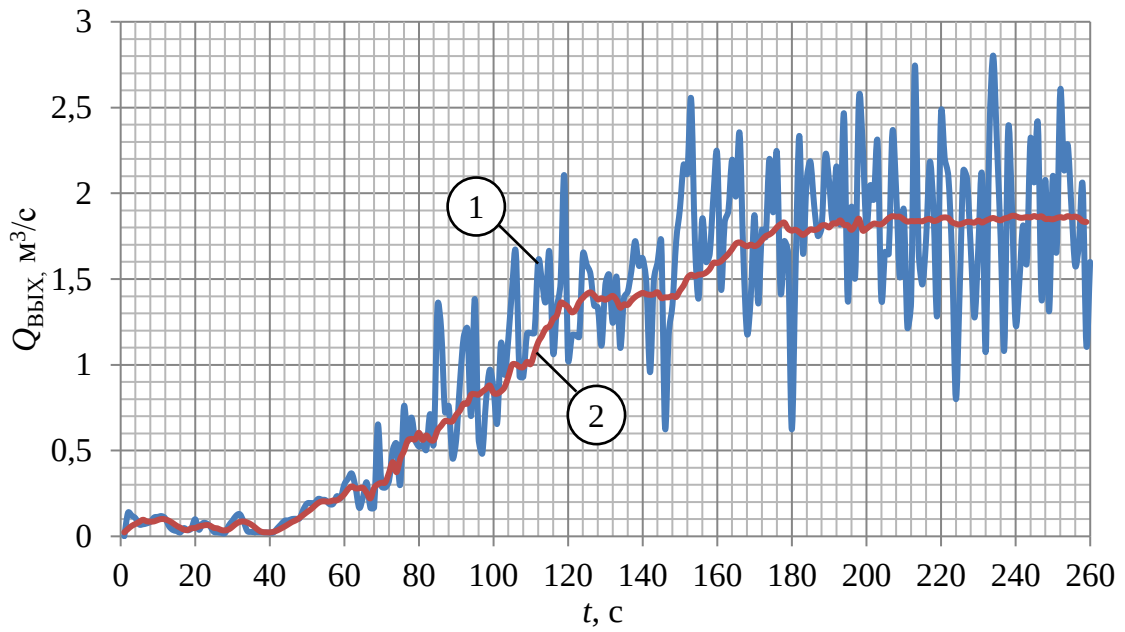


Рисунок 41. Результаты эксперимента: 1) $Q_{\text{ВЫХ}}$ с шумами измерения; 2) $Q_{\text{ВЫХ}}$ после фильтрации методом скользящего среднего

Приведенные данные свидетельствуют о достаточной адекватности используемой компьютерной модели. Так, максимальное расхождение данных моделирования и эксперимента не превышает 15 %, а расхождение переходных процессов по времени составляет порядка 10..12 с, что расценивается как приемлемое.

Таким образом, применение автоматизированной системы частотного регулирования параметров атмосферы тупиковой выработки обеспечит повышение безопасности ведения горных работ с точки зрения требований к составу рудничной атмосферы, позволит понизить энергопотребление, а также снизит динамические нагрузки как на электропривод вентилятора, так и на вентиляционную сеть.

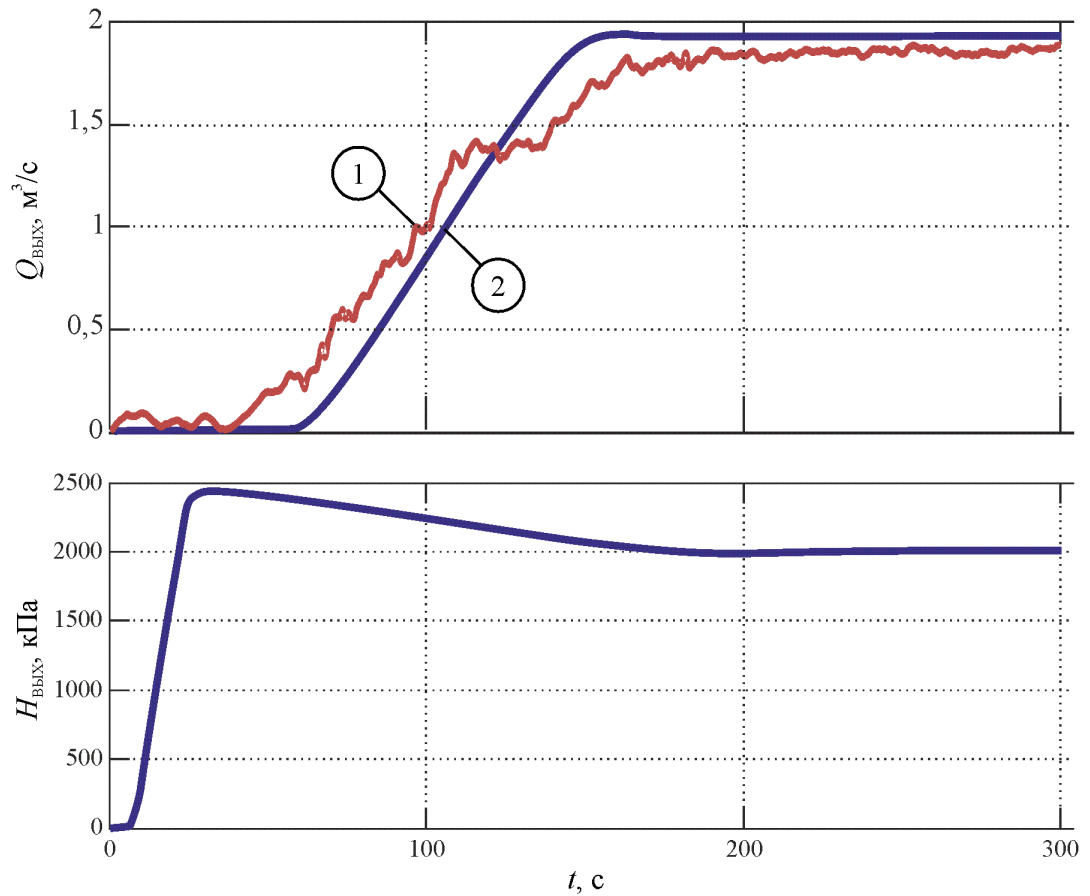


Рисунок 42. Результаты моделирования – напор $H_{ВЫХ}$ и поток $Q_{ВЫХ}$ воздуха на выходе вентиляционной сети: 1) экспериментальные данные; 2) данные модели

3.4 Результаты и выводы

В ходе вычислительных и практических экспериментов получено сравнение энергопотребления различных вариантов запуска ВМП, произведено моделирование САУ ВМП, произведен анализ энергопотребления вентилятора при различных режимах работы, проведен практический эксперимент.

Установлено что энергопотребление вентилятора с применением преобразователя частоты для плавного заполнения вентиляционной сети уменьшается в незначительных пределах, и в основном, позволяет увеличить эксплуатационную надежность воздуховодов. Также анализ энергопотребления установил, что если исключить из вентиляционной

сети дополнительные сопротивления для регулирования производительности вентилятора, а регулировать по средствам преобразователя частоты, то максимальная экономия энергопотребления может составить порядка 15 кВт·час.

Моделирование САУ ВМП подтвердило предположение о возможности регулировать состав атмосферы в выработке изменяя производительность вентилятора, а также подтвердило эффективность предлагаемого алгоритма настройки регуляторов.

Результаты практического эксперимента доказали выдвигаемые ранее в работе предположения.

Исходя из общего содержания выполненной работы можно сделать вывод о целесообразности внесения изменений в Правила безопасности на угольных шахтах, включающих возможность оперативного регулирования в автоматическом режиме производительности вентилятора местного проветривания тупиковых выработок с целью более рационального с точки зрения энергопотребления выполнения требований к составу рудничной атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной задачи поддержания параметров рудничной атмосферы тупиковой выработки, в пределах установленных Правилами безопасности, по средствам регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания, повышения энергоэффективности электропривода вентилятора местного проветривания, что имеет важное теоретическое и практическое значение для развития угольной отрасли страны.

Основные результаты выполненного исследования заключаются в следующем:

1. В ходе анализа информационных источников установлено, что для электропривода вентиляторов местного проветривания тупиковых выработок с использованием существующих технических средств может быть реализована система автоматизированного частотного управления, обеспечивающая повышение энергетической эффективности при соблюдении требований Правил безопасности на угольных шахтах.

2. Разработанная математическая модель, включающая призабойное пространство, вентиляционную сеть, вентилятор местного проветривания и управляющий преобразователь частоты, позволяет производить оценку энергетической эффективности и состава рудничной атмосферы при работе системы местной вентиляции тупиковой выработки с учетом протекающих в ней переходных процессов;

3. Предложенная в работе система многокритериального управления частотно-регулируемым электроприводом вентилятора местного проветривания на основе метода взвешивания обеспечивает поддержание концентрации газов CH_4 , CO и CO_2 в составе рудничной атмосферы в пределах допустимых диапазонов их концентрации, а также позволяет снизить энергопотребление вентилятора, в частности рассматриваемого вентилятора ВМЭ-6 на 15 кВт;

5. Проведенные в работе вычислительные эксперименты и экспериментальные исследования на физической модели подтвердили адекватность используемого математического описания системы вентиляции с погрешностью не более 15 %;

6. Показана целесообразность внесения изменений в Правила безопасности на угольных шахтах, включающих возможность оперативного регулирования в автоматическом режиме производительности вентилятора местного проветривания тупиковых выработок с целью более рационального с точки зрения энергопотребления выполнения требований к составу рудничной атмосферы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АГК – аэрогазовый контроль.

АД – асинхронный электродвигатель.

АРМ – автоматизированное рабочее место.

БВ – блок взвешивания.

БР – блок регуляторов.

ВМП – вентилятор местного проветривания.

ВС – вентиляционная сеть.

ГШО – горно-шахтное оборудование.

ПБ – правила безопасности в угольных шахтах.

ПИ – пропорционально-интегральный.

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный.

ПЧ – преобразователь частоты.

САУ – система автоматического управления.

ФЗ – формирователь задания.

ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перечень нормативной документации

1. Временные требования безопасности при эксплуатации монорельсовых дорог в угольных шахтах (РД 05-323-99), с изменением (РДИ 05-481(323)-02). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 10.11.99. 2 Издание: Внесено Изменение № 1 (РДИ 05-481(323)-02), утвержденное Постановлением Госгортехнадзора РФ от 23 июля 2002 г. № 46
2. Инструкции по прогнозу, обнаружению, локации и контролю очагов самонагревания угля и эндогенных пожаров в угольных шахтах. Утверждены приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 ноября 2012 г. N 635
3. Инструкция по безопасной перевозке людей ленточными конвейерами в подземных выработках угольных и сланцевых шахт (РД 05-526-03). Утверждена постановлением Госгортехнадзора России от 30.12.02 № 73.
4. Инструкция по безопасной эксплуатации рельсовых напочвенных дорог в угольных шахтах (РД 05-324-99), с изменением (РДИ 05-480(324)-02). Утверждена постановлением Госгортехнадзора России от 10 ноября 1999 г. 2 Издание: Внесено Изменение № 1 (РДИ 05-480(324)-02), утвержденное Постановлением Госгортехнадзора РФ от 23 июля 2002 г. № 46
5. Инструкция по дегазации угольных шахт. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 679 от 1 декабря 2011 г.
6. Инструкция по контролю состава рудничного воздуха, определению газообильности и установлению категорий шахт по метану и/или диоксиду углерода. Утверждена приказом Федеральной

службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 декабря 2012 г. N 704

7. Инструкция по локализации и предупреждению взрывов пылегазовоздушных смесей в угольных шахтах. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 ноября 2012 г. N 634.
8. Инструкция по осмотру и ревизии рудничного взрывобезопасного электрооборудования. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 ноября 2012 г. N 631.
9. Инструкция по предупреждению самовозгорания, тушению и разработке породных отвалов. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 декабря 2011 г. N 738.
10. Инструкция по применению схем проветривания выемочных участков угольных шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 680 от 1 декабря 2011 г.
11. Инструкция по применению электрооборудования в рудничном нормальном исполнении и электрооборудовании общего назначения в шахтах, опасных по газу и пыли. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 ноября 2012 г. N 629
12. Инструкция по проведению плановой практической проверки аварийных вентиляционных режимов, предусмотренных планом ликвидации аварий. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 ноября 2012 г. N 638.

13. Инструкция по проверке максимальной токовой защиты шахтных аппаратов. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 ноября 2012 года № 626.
14. Инструкция по разгазированию горных выработок, расследованию, учету и предупреждению загазирования. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 ноября 2012 г. № 636.
15. Инструкция по составлению вентиляционных планов угольных шахт. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 ноября 2012 г. № 637.
16. Инструкция по составлению планов ликвидации аварий на угольных шахтах. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 681 от 1 декабря 2011 г.
17. Инструкция по электроснабжению и применению электрооборудования в проветриваемых ВПМ тупиковых выработок шахт, опасных по газу. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 ноября 2012 г. №628.
18. Методические рекомендации о порядке ведения огневых работ в горных выработках и надшахтных зданиях угольных (сланцевых) шахт (РД-15-10–2006). Утверждены приказом Ростехнадзора от 22.11.06 № 1029.
19. Методические указания о порядке проведения испытаний стальных канатов на канатно-испытательных станциях (РД-15-12-2007). Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31 июля 2007 г. № 522.

20. Нормы безопасности на транспортные машины с дизельным приводом для угольных шахт (РД 05-311-99), с изменением (РДИ 05-478(311)-02). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 30.09.99 № 71.
21. ПБ 05-351-00. Правила проведения экспертизы промышленной безопасности проектов противопожарной защиты угольных шахт, опасных производственных объектов угольной промышленности: утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 04.04.2000 № 15.
22. ПБ 05-580-03. Правила безопасности на предприятиях при обогащении и брикетировании углей (сланцев): утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 30.06.03 г. № 46.
23. ПБ 05-618-03. Правила безопасности в угольных шахтах. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 05.06.03 № 50, зарегистрированным Министерством юстиции Российской Федерации 19.06.03 г., регистрационный № 4737.
24. Положение о проведении экспертизы промышленной безопасности в угольной промышленности (РД 05-432-02). Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14 ноября 2013 г. N 538.
25. Положение о пылегазовом режиме на углеобогачительных фабриках (установках). Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 677 от 1 декабря 2011 г.
26. Положение об аэрогазовом контроле в угольных шахтах. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 678 от 1 декабря 2011 г.
27. РД 05-325-99. Нормы безопасности на основное горнотранспортное оборудование для угольных шахт, с изменением (РДИ 05-477(3-25)-02): утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 10 ноября 1999 г. № 83.

28. РД 05-328-99. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам: утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 29.11.99 № 87.
29. РД 05-335-99. Требования к изготовлению рудничного электрооборудования напряжением 1140 В, с изменением (РДИ 05-479(335)-02): утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 24 декабря 1999 г. № 96.
30. РД 05-336-99. Инструкция по применению электрооборудования напряжением 1140 В на предприятиях по добыче и переработке угля и сланца:.
31. РД 05-350-00. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа: утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 04.04.00 № 14.
32. РД 05-365-00. Инструкция по разработке проекта противопожарной защиты угольной шахты: утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 22.06.2000 № 37.
33. РД 05-366-00. Инструкция по проектированию пожарно-оросительного водоснабжения шахт: утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 22.06.2000 № 37.
34. РД 05-386-00. Временная инструкция по электроснабжению и применению электрооборудования напряжением 3000В (3300В) в очистных и подготовительных выработках угольных шахт: утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 02.10.00 № 56.
35. РД 05-387-00. Временная инструкция по выбору и проверке электроаппаратов, кабелей и устройств релейной защиты в участковых сетях напряжением 3000В (3300В) в угольных шахтах: утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 02.10.00 № 56.
36. РД 05-447-02. Положение о порядке изменений конструкций отдельных экземпляров оборудования, используемого на угольных

и сланцевых шахтах: утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 28.05.02 г. № 40.

37. РД 05-448-02. Инструкция по централизованному контролю и управлению пожарным водоснабжением угольных шахт: утв. и введена в действие с 01.09.02 постановлением Госгортехнадзора РФ от 10.06.02 № 23.
38. Технические требования по безопасной эксплуатации транспортных машин с дизельным приводом в угольных шахтах (РД 05-312-99). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 30.09.1999 № 71.

2. Перечень научных публикаций

39. А. Пуанкаре. Теория вихрей. – Ижевск: НИЦ "РХД", 2000. –160 с.
40. Алыменко Н.И. Требования к современным осевым вентиляторам местного проветривания / Н.И. Алыменко, Д.Н. Алыменко, И.И. Трапезников, А.В. Ковалев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2003. - № 10. – С 168 – 170.
41. Алымов А.Г. Анализ течения в лопастной системе осевого вентилятора с применением CFD-расчетов / А.Г. Алымов, В.А. Бабин, Д.В. Дормидонтов //
42. Баталов М.С. Система автоматического регулирования шахтного вентилятора с применением теории нечетких множеств / М.С. Баталов // Сборник научных трудов SWORLD. – 2012. - № 2. – С 96 – 100.
43. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
44. Васенин И.М. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И.М. Ва-

- сенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н. Костеренко // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. - № 2. – С 155 – 163.
45. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – 6-е изд., испр. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
 46. Виноградов А. Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Электротехника. – 2005. – № 5. – С. 57-62.
 47. Виноградов А.Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А.Б. Виноградов, В.Л., Чистосердов, А.Н. Сибирцев // Электротехника. – 2003. – № 7. – С. 7-17.
 48. Волобуев А.Н. Некоторые особенности гидродинамики потока жидкости в эластичном трубопроводе / А.Н. Волобуев, А.П. Толстоногов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2005. - № 4. – С 45 – 48.
 49. Г. Биркгоф. Гидродинамика. Методы. Факты. Подобие. – М.: Иностранная литература, 1963. – 246 с.
 50. Г. Вилля. Теория вихрей. – М., Л.: ОНТИ - Глав. ред. общетехнической литературы, 1936. – 266 с
 51. Г. Гельмгольц. Основы вихревой теории. – М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002 . – 82 с.
 52. Г. Кирхгоф. Механика. 404 стр. М.: Изд. АН СССР, 1962 .
 53. Г. Ламб. Гидродинамика. – М., Л.: Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1947. – 928 с.
 54. Газизуллин Р.Р. Численное моделирование процессов выноса вредных примесей рудничной атмосферы при проветривании тупиковых выработок различными способами / Р.Р. Газизуллин,

- А.Г. Исаевич, Л.Ю. Левин // Научные исследования и инновации. – 2011. - № 2. – С 127 – 129.
55. Глебов Р.С. Практические аспекты идентификации математической модели вентиляционной установки / Р.С. Глебов, М.П. Туманов, С.С. Антюшин // Естественные и технические науки. – 2012. – № 2. – С. 330-339.
56. Голышев А.М. Распространение вредных газов в тупиковой горной выработке / А.М. Голышев, Э.В. Серебренников, А.В. Давыдов, Е. В. Пищикова // Вестник криворожского национального университета. – 2013. - № 4 (33). – С 225 – 228.
57. Гриценко Б.А. Идентификация аэромеханических параметров шахтных вентиляционных трубопроводов на основе математического моделирования / Б.А. Гриценко // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. - № 1. – С 80 – 82.
58. Дацковский Л.Х. Электропривод шахтных стационарных установок. Современное состояние и перспективы / Л.Х. Дацковский, В.И. Роговой // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2006. - № 66. – С 94 – 102.
59. Дж. Бэтчелор. Введение в динамику жидкости. – М.: Мир, 1973. – 792 с.
60. Дж. Серрин. Математические основы классической механики жидкости. – М.: Изд. иностранной литературы, 1963. – 256 с.
61. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года: утв. Правительством РФ 24.01.2012 г. N 14-р.
62. Ещин Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. – Кемерово: КузГТУ, 2003. – 247 с.

63. Жданов А.О. Характеристики асинхронных двигателей различного номинального напряжения мощностью 110 кВт электропривода вентилятора ВМЭ-12 / А.О. Жданов, В.А. Трефилов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. - № 8. – С 100 – 105.
64. Зедгенизов Д.В. Исследование двухканальной системы автоматического управления расходом воздуха в тоннеле метрополитена / Д.В. Зедгенизов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. - № 1. – С 264-267.
65. Зедгенизов Д.В. Обзор состояния проблемы шахтных подземных регуляторов расхода воздуха / Д.В. Зедгенизов, В.В. Фурса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2004. - № 10. – С 264 – 269.
66. Зедгенизов Д.В. Основные принципы автоматического управления вентиляцией линии метрополитена / Д.В. Зедгенизов // Горный информационно-технический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. - № 9. – С 358 – 364.
67. Зедгенизов Д.В. Синтез алгоритма управления тоннельным вентилятором с поворотными на ходу лопатками рабочего колеса / Д.В. Зедгенизов //
68. Зедгенизов Д.В. Система автоматического управления частотным электроприводом тоннельного вентилятора метрополитена / Д.В. Зедгенизов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. - № 4. – С 207 – 210.
69. Зедгенизов Д.В. Система автоматического управления частотным электроприводом тоннельного вентилятора метрополитена // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2008. – №4. – С 207 – 210.

70. Зедгенизов Д.В. Управление синхронным электроприводом главного вентилятора при автоматизации проветривания шахт / Д.В. Зедгенизов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. - № 8. – С 72 – 76.
71. Ивановский, И.Г. Шахтные вентиляторы: учеб. пособие / И.Г. Ивановский. – Владивосток: ДВГТУ, 2003. – 196 с.
72. Калинин А.Г. Эффективность применения регулируемого электропривода вытяжных вентиляторов / А.Г. Калинин, В.Н. Ларионов, А.В. Шепелин // Вестник Чувашского университета. – 2009. - № 2. – С 126 – 132.
73. Каменецкий Е.С. Модель вентиляции тупиковой выработки методом разделенных потоков / Е.С. Каменецкий, А.В. Чупин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. - № 7. – С 229 – 232.
74. Кан О.А. Компьютерное моделирование процесса обработки сигналов в системе централизованного аэрогазового контроля / О.А. Кан, Б.Р. Жолмагамбетова, С.Р. Жаксыбаева, Ж.Б. Кадирова, А.Т. Жаркимбекова // Автоматика. Информатика. – 2013. - № 32. – С 46 – 48.
75. Карандаев А.С. Анализ надежности оборудования тепловой электростанции при внедрении преобразователей частоты / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, О.И. Карандаева, Ю.Н. Ротанова, В.В. Ровнейко, Р.Р. Галлямов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2009. - № 34 (167). – С 16 – 22.
76. Качурин Н.М. Математическое моделирование аэрогазодинамики тоннелей при проходке буровзрывным способом / Н.М. Качурин, О.В. Коновалов, А.Н. Качурин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. - № 5. – С 304 – 314.

77. Каширских В. Г. Сравнительный анализ способов плавного пуска асинхронных электроприводов горных машин / В. Г. Каширских, С. С. Переверзев // Горный.
78. Каширских В.Г. Автоматизированный испытательный комплекс для идентификации параметров асинхронных электродвигателей горных машин / В.Г. Каширских, В.М.
79. Ключев В.И. Теория электропривода: Уче. Для вузов. – 2-е изд. Перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.: ил.
80. Козырев С.А. Математическое моделирование проветривания тупиковых выработок при взрывных работах с использованием CFD-моделей / С.А. Козырев, П.В. Амосов // Аэрология и безопасность горных предприятий. – 2013. – С 23 – 29.
81. Колесниченко Е.А. Концепция проектирования системы вентиляции, обеспечивающей снижение риска взрывов метана и угольной пыли в забоях тупиковых выработок / Е.А. Колесниченко, В.Б. Артемьев, И.Е. Колесниченко, Е.И. Любомищенко // Уголь. – 2013. - № 2 (1043). – С 37 – 41.
82. Колесниченко Е.А. Обоснование методики расчёта режима вентиляции метанообильных забоев подготовительных выработок / Е.А. Колесниченко, И.Е. Колесниченко, В.Б. Артемьев // Горная промышленность. – 2009. - № 5. – С 46 – 50.
83. Коломыцев В.Г. Идентификация параметров лабораторной системы водоснабжения для построения разомкнутой системы управления / В.Г. Коломыцев, Д.А. Даденков, Л.В. Поносова, А.П. Честиков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2009. - № 3. – С 200 – 208.
84. Коньшин В. Применение программного комплекса FlowVision для математического анализа конструкции шахтного вентилятора

85. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 1987. – 247 с.
86. Круглов Ю.В. Использование CFD-методов при исследовании аэрогазодинамических процессов в рудничной аэрологии / Ю.В. Круглов, Р.Р. Газизуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. - № 4. – С 211 – 213.
87. Л. Прандтль, О.Титъенс. Гидро- и аэромеханика. т.1. – М., Л.: Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1933. – 224 с.
88. Л.Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. – М.,Л.: Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1950. – 676 с.
89. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика: Гидродинамика. т.6. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
90. Л.М. Милн-Томсон. Теоретическая гидродинамика. – М.: Мир, 1964. 660 с.
91. Лапко В.В. Аэродинамические модели с сосредоточенными параметрами лавы шахтной вентиляционной сети / В.В. Лапко, О.Ю. Чередникова // Наукові праці ДонНТУ: серія інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка. – 2008. – №9(132). – С. 111-114.
92. Ли К.Х. Текущий прогноз и оперативная корректировка параметров проветривания подготовительных выработок угольных шахт Кузбасса / К.Х Ли // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – Т 1.2. – С 98 – 100.
93. Ли К.Х. Текущий прогноз метановыделения и параметров проветривания при проведении подготовительных выработок / К.Х. Ли // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. - № 1. – С 83 – 85.
94. Ли Хи Ун К вопросу управления газовыделением средствами вентиляции / Ли Хи Ун, А.Н. Кнышенко, Ю.С. Лермонтов // Вестник

- научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2008. - № 2. – С 84 – 87.
95. М. Ван-Дайк. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986. – 184 с.
 96. М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
 97. Макаров В.Н. Генезис шахтного вентиляторостроения и перспективы его развития / В.Н. Макаров, С.А. Волков, В.И. Фомин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. - № 8. – С 266 – 271.
 98. Программу развития Энергетики Российской Федерации. Состояние отрасли. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://minenergo.gov.ru/activity/coalindustry/state_of_the_industry/.
 99. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением от 24 января 2012 г. №14-р.
 100. Программа по обеспечению дальнейшего улучшения условий труда, повышения безопасности ведения горных работ, снижения аварийности и травматизма в угольной промышленности, поддержания боеготовности военизированных горноспасательных, аварийно-спасательных частей на 2012-2013 гг.
 101. Министерство Энергетики Российской Федерации. Состояние отрасли. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://minenergo.gov.ru/activity/coalindustry/state_of_the_industry/
 102. Морозова, Т.Г. Экономическая география России / Т.Г. Морозова. – М.: Юнити, 2008.
 103. Мохирев Н.Н. Экономические показатели при замене крупных вентиляторов на вентиляторы меньшего типоразмера / Н.Н. Мохирев, В.В. Радько // Вестник Пермского национального исследо-

- вательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2006. - № 1. – С 314 – 318.
104. Мухамадеев А.Р. Преобразователи частоты и устройства плавного пуска для электроприводов переменного тока / А.Р. Мухамадеев // Энергетика Татарстана. – 2010. - № 1. – С 44 – 53.
 105. Н.А. Слезкин. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. – М.: Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1955. – 520 с.
 106. Н.Е. Жуковский. Гидродинамика. Собрание сочинений, том 2. – М.: М.,Л.: Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1949. – 765 с.
 107. Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. Теоретическая гидромеханика, часть 1. – М.: Физматгиз, 1963. – 584 с.
 108. Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. Теоретическая гидромеханика, часть 2. – М.: Физматгиз, 1963. – 728 с.
 109. П. Чжен. Отрывные течения. т.1. – М.: Мир, 1972. – 300 с.
 110. П. Чжен. Отрывные течения. т.2. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
 111. П. Чжен. Отрывные течения. т.3. – М.: Мир, 1973. – 334 с.
 112. Панферов В.И. Численное моделирование переходных процессов в газопроводах / В.И. Панферов, А.А. Февралев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: строительство и архитектура. – 2008. - № 25 (125). – С 40 – 44.
 113. Петров Н.Н. Метод моделирования воздействия внезапного выброса угля и газа на режим проветривания шахты / Н.Н. Петров, М.Ю. Шишкин, С.В. Линев // Управление вентиляцией и газодинамическими процессами в шахтах: сборник научных трудов. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. – С. 138-145.
 114. Пивняк, Г.Г. Методы и средства энергоконтроля процессов подземной угледобычи / Г.Г. Пивняк, В.Т. Заика, В.В. Самойленко // Электрика. – 2006. – № 6. – С. 3-7.

115. Плехов А.С. Создание и использование потоков данных в управлении группой электроприводов насосов и вентиляторов / А.С. Плехов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. - № 2. – С 23 – 26.
116. Программа по обеспечению дальнейшего улучшения условий труда, повышения безопасности ведения горных работ, снижения аварийности и травматизма в угольной промышленности, поддержания боеготовности военизированных горноспасательных, аварийно-спасательных частей на 2012-2013 годы: утв. Минэнерго России, Минздравсоцразвития России, МЧС России, Ростехнадзором в 2012 г. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://minenergo.gov.ru/documents/fold13/index.php?ELEMENT_ID=14017.
117. Продукция Davis Derby Ltd [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.davisderby.com/product_group.php?range=5.
118. Продукция Trolex Ltd [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.trolex.com/systems>.
119. Продукция НПФ «Гранч» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.granch.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=40&Itemid=7.
120. Продукция ООО "ИНГОРТЕХ" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ingortech.ru/produktsiya/statsionarnye-sistemy/paragraf-41-pb/aerologicheskaya-zashchita-p-41-pb.html>.
121. Продукция ООО «Электромашина» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elektro-mashina.ru/section/213.html>.
122. Продукция ООО «Горный - ЦОТ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://indsafe.ru/>.
123. Радченко В.В. Перспективы повышения уровня промышленной безопасности угольных шахт при использовании системы диспет-

черского контроля (УТАС) / В.В. Радченко, Н.В. Малеев, А.А. Мартынов, В.С. Захаров, В.А. Шевцов

124. Русецкая Г.В. Алгоритм интегрирования уравнений движения механической системы «радиальный лопастной насос» / Г.В. Русецкая // Наука и техника транспорта. – 2008. - № 2. – С 89 – 93.
125. Рушкин Е.И. Исследование системы частотно-регулируемого электропривода вентилятора главного проветривания при помощи моделирования / Е.И. Рушкин, А.С. Семёнов // Технические науки – от теории к практике. – 2013. - № 20. – С 34 – 41.
126. С.В. Валландер. Лекции по гидроаэромеханике. – Л.: Изд. ЛГУ, 1978. – 296 с.
127. Самохин Д.В. Анализ возможностей снижения энергопотребления малогабаритных вентиляторов / Д.В. Самохин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2006. - № 1. – С 10 – 11.
128. Сарваров, А.С. Энергосберегающий электропривод вентиляторных механизмов по системе НПЧ-АД с программным формированием напряжения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 2002. – 36 с.
129. Т. Карман. Аэродинамика. Избранные темы в их историческом развитии. – Ижевск: НИЦ "РХД", 2001. – 208 с.
130. Тахо-Годи А.З. Мехатронные системы автоматического управления проветриванием горных выработок / А.З. Тахо-Годи // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2014. - № 2 (18). – С 94 – 98.
131. Тахо-Годи А.З. Регулирующее устройство для систем вентиляции горных тупиковых выработок / А.З. Тахо-Годи // Фундаментальные исследования. – 2011. - № 12-1. – С 184 – 186.

132. Терехов В. М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений. Под ред. В.М.Терехова. — 2-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 304 с.
133. Ушаков, К.З. Аэрология горных предприятий: учебник для вузов / К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков, И.И. Медведев. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1987. — 421 с.
134. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. — Мн.:Техноперспектива, 2006. — 363 с.
135. Х. Рауз. Механика жидкости. — М.: Изд. литературы по строительству, 1967. — 392 с.
136. Харчук С.И. Расчет напорной характеристики центробежного насоса численным методом / С.И. Харчук, А.В. Болдырев, С.М. Жижин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2009. - № 2. — С 51 — 58.
137. Шонин О.Б. Минимизация потерь в частотно-регулируемом приводе вентиляторов главного проветривания шахт / О.Б. Шонин, В.С. Пронько // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2014. - № 2 (195). — С 70 — 77.
138. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года : [гос. программа РФ: утв. распоряжением Правительства РФ от 27 декабря 2010 года, № 2446-р]. — Режим доступа:
<http://www.minenergo.gov.ru/activity/energoeffektivnost/documents/index.php?>
139. Эпштейн И.И. Выбор оптимального варианта электропривода для мощных механизмов с вентиляторной моментной характеристикой / И.И. Эпштейн // Электротехнические и компьютерные системы. — 2011. - № 3. — С 188 — 190.

3. Список публикаций по теме диссертации

140. Маслов И.П. Математическое моделирование различных способов пуска вентилятора местного проветривания с электрическим приводом / И.П. Маслов, И.Ю. Семыкина // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 2. – С. 67-73.
141. Маслов И.П. Особенности настройки регуляторов для управления вентиляторами местного проветривания угольных шахт / И.П. Маслов, И.Ю. Семыкина // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в образовании, науке и производстве: труды VI Всероссийской научно-практической конференции, 25-27 ноября 2014.– Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – С. 104-108.
142. Маслов И.П. Экспериментальное исследование работы адаптивной системы управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом вентилятора местного проветривания / И.П. Маслов, И.Ю. Семыкина // I Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». – Кемерово: КузГТУ, 2014. – С. 96-101.
143. Маслов И.П. Вопросы обеспечения энергетической эффективности и безопасности ведения горных работ за счет усовершенствования систем местного проветривания угольных шахт / И.П. Маслов, И.Ю. Семыкина // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 1.2. – С 105-110.
144. Маслов И.П. Исследование многокритериальной системы автоматического управления шахтным вентилятором местного проветривания / И.П. Маслов, И.Ю. Семыкина, А.В. Киселев, А.Э. Евстратов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S-9. – С 3-12.
145. Маслов И.П. Концепция системы управления вентилятором местного проветривания угольных шахт / И.П. Маслов, И.Ю. Семыки-

- на // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VI международной научно-технической конференции, 9-11 октября 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 122-126.
146. Маслов И.П. Обеспечение безопасности горных работ в угольных шахтах при проведении тупиковых выработок средствами вентиляторов местного проветривания / И.П. Маслов, И.Ю. Семькина // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Материалы X Международной научно-практической конференции, 28-29 ноября 2013 г. – Кемерово: КузГТУ, 2013. – С. 117-123.
147. Маслов И.П. Управление шахтным вентилятором местного проветривания в автоматическом режиме / И.П. Маслов, И.Ю. Семькина, А.В. Киселев // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 10. – С. 43-45.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«КУЗБАССКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ ЦЕНТР
ОХРАНЫ ТРУДА»
(ООО «Горный-ЦОТ»)**

650002, г. Кемерово, Сосновый бульвар, 1.
Тел./факс (384 2) 34-06-70.
E-mail: 340670@rambler.ru

СПРАВКА

Общество с ограниченной ответственностью «Кузбасский региональный горный центр охраны труда», рассмотрев результаты работы научного коллектива Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева (научный руководитель – к.т.н., доцент И.Ю. Семькина, отв. исполнитель – ст. преподаватель И.П. Маслов, исполнители – ассистент А.Э. Евстратов, ассистент А.В. Киселев) по проекту «Обеспечение энергической эффективности и безопасности функционирования систем местного проветривания угольных шахт» приняло к использованию научную разработку «Система управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом вентилятора местного проветривания угольных шахт» для внедрения в технологический процесс производства предприятия.

Директор
ООО «Горный-ЦОТ»



Попов М.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Программное средство управления установкой УПП-1

```
unit Unit1;
interface
uses
    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
    Dialogs, StdCtrls, CPDrv, ExtCtrls, TeEngine, Series, TeeProcs,
    Chart;
type
    TForm1 = class(TForm)
        Button1: TButton;
        Label1: TLabel;
        CommPortDriver1: TCommPortDriver;
        Button2: TButton;
        Button3: TButton;
        Button4: TButton;
        Edit1: TEdit;
        Shape1: TShape;
        Label2: TLabel;
        Timer1: TTimer;
        Button5: TButton;
        CommPortDriver2: TCommPortDriver;
        Button6: TButton;
        Button7: TButton;
        Shape2: TShape;
        Memo1: TMemo;
        Timer2: TTimer;
        Memo2: TMemo;
```

```

CheckBox1: TCheckBox;
Button8: TButton;
Button9: TButton;
Timer3: TTimer;
Chart1: TChart;
Series1: TFastLineSeries;
Series2: TFastLineSeries;
Series3: TFastLineSeries;
Label3: TLabel;
SaveDialog1: TSaveDialog;
Button10: TButton;
Series4: TFastLineSeries;
Chart2: TChart;
FastLineSeries1: TFastLineSeries;
FastLineSeries2: TFastLineSeries;
Memo3: TMemo;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure      CommPortDriver1ReceiveData(Sender:      TObject;
DataPtr: Pointer;
      DataSize: Cardinal);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);
procedure Button7Click(Sender: TObject);
procedure      CommPortDriver2ReceiveData(Sender:      TObject;
DataPtr: Pointer;
      DataSize: Cardinal);

```

```

    procedure Timer2Timer(Sender: TObject);
    procedure Button8Click(Sender: TObject);
    procedure Button9Click(Sender: TObject);
    procedure Timer3Timer(Sender: TObject);
    procedure Button10Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;
var
    Form1: TForm1;
    MyArray: Array[0..9] of Byte;
    RecCounter : Byte = 0;    // количество принятых данных
    RecBuffer : array[0..8] of Byte;
    modbusbuf : array [0..5] of Byte;
    AI: array[0..5] of word;
    Nfunc : Byte;
    WriteRegFlag : integer;
    ReadRegFlag : integer;
    GlobalTime: Cardinal = 0;
    Time : TDateTime;
    wz : Single = 0;
    wref: Single = 0;
    Sum : Single;
    temp, speed :double;
    stop : boolean = false;
implementation
{$R *.dfm}

```

```

//Расчет контрольной суммы CRC16
Function reg_chk(Data: Pointer; lenght: Byte) : Word;
var
  j,k : integer;
  reg_crc : Word;
  DataByte: Byte;
begin
  k:=0;
  reg_crc:= $FFFF;
  while lenght>0 do
    begin
      DataByte := byte((Pointer(Integer(Data)+k))^);
      reg_crc:= reg_crc xor DataByte;
      //исключающее ИЛИ с первыми 8 битами байта сообщения и
содержимым CRC регистра;
      for j := 0 to 7 do
        begin
          if (reg_crc and $1)=1 then
            reg_crc:=(reg_crc shr 1) xor $A001
          else reg_crc:=reg_crc shr 1;
        end;
      k:= k + 1;
      lenght:= lenght - 1;
    end;
    Result:= reg_crc;
  end;
//Формирования пакета запроса чтения регистров
Procedure request_modbus_read(net,kod,reg,kol_reg : word);
var

```

```

request: Array[0..7] of Byte;
crc16 : word;
i      : integer;
s      : string;
begin
  Nfunc := $03;
  request[0] := net; //адрес подчиненного устройства
  request[1] := kod; //код функции
  request[2] := hi(reg); //адрес регистра
  request[3] := lo(reg);
  request[4] := hi(kol_reg); //количество опрашиваемых реги-
с тров
  request[5] := lo(kol_reg);
  crc16 := reg_chk(@request[0],6); //Расчет контрольной суммы
  request[6] := lo(crc16);
  request[7] := hi(crc16);
  for i:= 0 to 7 do
    Form1.CommPortDriver1.SendByte(request[i]);
    //s:= "; //ASCII
  //for i:= 0 to 7 do
  // s:= s + inttohex(request[i],2)+' ';
  // s:= "; for i:= 0 to 7 do s:= s + chr(request[i]);
  //Result := s;
end;
// Формирование запросов на запись
Procedure request_modbus_write(net,kod,reg,data : word);
var
  request: Array[0..7] of Byte;
  crc16 : word;
  i      : integer;

```

```

begin
  Nfunc := $06;
  request[0] := net; //адрес подчиненного устройства
  request[1] := kod; //код функции
  request[2] := hi(reg); //адрес регистра
  request[3] := lo(reg);
  request[4] := hi(data); //данные
  request[5] := lo(data);
  crc16 := reg_chk(@request[0],6); //Расчет контрольной суммы
  request[6] := lo(crc16);
  request[7] := hi(crc16);
  for i:= 0 to 7 do
    Form1.CommPortDriver1.SendByte(request[i]);
  end;
  procedure Modbus_write(BufferPtr: Pointer; BufferSize: Byte);
  var
    CalcCrc16, ReadCrc16 : Word;
  begin
    ReadCrc16 := Word((Pointer(Integer(BufferPtr) + BufferSize -
2))^);
    CalcCrc16 := reg_chk(BufferPtr,BufferSize - 2);
    if ReadCrc16<>CalcCrc16 then
      begin
        Exit;
      end else
        WriteRegFlag:=1;
    end;
  procedure ModBus_read(BufferPtr: Pointer; BufferSize: Byte);
  Var i : integer;
    DataByte : Byte;

```

```

    CalcCrc16, ReadCrc16 : Word;
    tempbuf : Pointer;
Begin
    ReadCrc16 := Word((Pointer(Integer(BufferPtr) + BufferSize -
2))^);
    CalcCrc16 := reg_chk(BufferPtr, BufferSize - 2);
    if ReadCrc16<>CalcCrc16 then Exit else
    begin
        modbusbuf[0] := Word((Pointer(Integer(BufferPtr)+4))^);
        AI[0] := Word((Pointer(Addr(modbusbuf[0])))^);
        Form1.Label2.Caption := FloatToStr(AI[0]);
        ReadRegFlag:=1;
    end;
End;
procedure TForm1.Button10Click(Sender: TObject);
begin
    Form1.Timer3.Enabled:=true;
end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    form1.SaveDialog1.DefaultExt := 'wmf';
    form1.SaveDialog1.Execute();
    Chart1.SaveToMetafile(form1.SaveDialog1.FileName);
    form1.SaveDialog1.Execute();
    Chart2.SaveToMetafile(form1.SaveDialog1.FileName);
    form1.SaveDialog1.DefaultExt := 'txt';
    form1.SaveDialog1.Execute();
    memo3.Lines.SaveToFile(SaveDialog1.FileName);
end;
//Altivar 312 Switch on

```



```

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
    Time:=Now;
    WriteRegFlag := 0;
    request_modbus_write(01,06,8501,06);
    while ((WriteRegFlag = 0) and (Now-Time < 5)) do
        begin
            Application.ProcessMessages;
            Form1.Label2.Caption := '+1';
        end;
    WriteRegFlag := 0;
    request_modbus_write(01,06,8501,07);
    while ((WriteRegFlag = 0) and (Now-Time < 5)) do
        begin
            Application.ProcessMessages;
        end;
    WriteRegFlag := 0;
    request_modbus_write(01,06,8501,15);
    while ((WriteRegFlag = 0) and (Now-Time < 5)) do
        begin
            Application.ProcessMessages;
        end;
    Form1.Timer1.Enabled := true;
end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
    Form1.CommPortDriver1.PortName:='\\.\' + 'COM2';
    Form1.CommPortDriver1.Disconnect;
    Form1.CommPortDriver1.Connect;
    if Form1.CommPortDriver1.Connected then

```

```

    Form1.Shape1.Brush.Color := clLime
else
    Form1.Shape1.Brush.Color := clRed;
end;
procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
begin
    form1.CommPortDriver1.Disconnect;
    if not Form1.CommPortDriver1.Connected then
        Form1.Shape1.Brush.Color := clRed;
end;
procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
var
    s : string;
    mack : Array[0..4] of cardinal;
    buf : Array[0..8] of word;
    i: integer;
    byt : TBytes;
begin
    for i := 0 to 8 do buf[i] := 0;
    s := (Form1.Edit1.Text);
    i := strtoint(s);
    byt:=TEncoding.UTF8.GetBytes(s);
    for i := 0 to 8 do buf[i] := byt[i] - 48;
    mack[0] := (buf[0] shl 8) + buf[1];
    showmessage(inttostr(mack[0]));
end;
//COM-Port ON for Онемометра
procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
begin
    Form1.CommPortDriver2.PortName:='\\.\' + 'COM4';

```

```

Form1.CommPortDriver2.Disconnect;
Form1.CommPortDriver2.Connect;
if Form1.CommPortDriver2.Connected then
    Form1.Shape2.Brush.Color := clLime
else
    Form1.Shape2.Brush.Color := clRed;
end;
procedure TForm1.Button7Click(Sender: TObject);
begin
    form1.CommPortDriver2.Disconnect;
    if not Form1.CommPortDriver2.Connected then
        Form1.Shape2.Brush.Color := clRed;
end;
procedure TForm1.Button8Click(Sender: TObject);
begin
    Form1.Timer3.Enabled:=false;
end;
//Altivar 312 Switch off
procedure TForm1.Button9Click(Sender: TObject);
begin
    Form1.Timer1.Enabled:=false;
    Time:=Now;
    WriteRegFlag := 0;
    request_modbus_write(01,06,8501,06);
    while ((WriteRegFlag = 0) and (Now-Time < 1)) do
        begin
            Application.ProcessMessages;
        end;
    Form1.Timer3.Enabled:=true;
end;

```

```

//Расширофка пакета данных
procedure TForm1.CommPortDriver1ReceiveData(Sender: TObject;
DataPtr: Pointer;
  DataSize: Cardinal);
var
  i : integer;
  DataByte : Byte;
begin
  if (Nfunc)=$03 then
    begin
      for i:= 0 to (DataSize-1) do
        begin
          DataByte := Byte((Pointer(Integer(DataPtr) + i))^);
          RecBuffer[RecCounter] := DataByte; // заполняем буфер
приема
          case (RecCounter) of
            0: if DataByte = $01 then RecCounter := RecCounter + 1;
            1: if DataByte = $03 then RecCounter := RecCounter + 1;
            2..7:
              begin
                RecCounter := RecCounter + 1;
              end;
          end;
        if (RecCounter > 6) then
          begin
            RecCounter := 0;
            ModBus_read(Addr(RecBuffer[0]),7);
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

if (Nfunc)=$06 then
begin
  for i:= 0 to (DataSize-1) do
    begin
      DataByte := Byte((Pointer(Integer(DataPtr) + i))^);
      RecBuffer[RecCounter] := DataByte; // заполняем буфер
приема
    case (RecCounter) of
      0: if DataByte = $01 then RecCounter := RecCounter + 1;
      1: if DataByte = $06 then RecCounter := RecCounter + 1;
      2..7:
        begin
          RecCounter := RecCounter + 1;
        end;
      end;
    if (RecCounter > 7) then
      begin
        RecCounter := 0;
        ModBus_write(Addr(RecBuffer[0]),8);
      end;
    end;
  end;
end;

//Процедура опроса/обработки Онеметра
procedure TForm1.CommPortDriver2ReceiveData(Sender: TObject;
DataPtr: Pointer;
  DataSize: Cardinal);
var
  p_abs,temp,coef,gamma,dp1,dp2,g,h: single;
  iLastLine, i: integer;

```

```

    s, ss: ansistring;
begin
    // Convert incoming data into a string
    s := StringOfChar( ' ', DataSize );
    move( DataPtr^, pchar(s)^, DataSize );
    // Exit if s is empty. This usually occurs when one or more NULL
characters
    // (chr(0)) are received.
    while pos( #0, s ) > 0 do
        delete( s, pos( #0, s ), 1 );
    if s = "" then
        exit;
    // Remove line feeds
    i := pos( #10, s );
    while i <> 0 do
    begin
        delete( s, i, 1 );
        i := pos( #10, s );
    end;
    // Don't redraw the rich edit control until we finished updating it
    //re.Lines.BeginUpdate;
    // Get last line index
    iLastLine := Memo1.Lines.Count-1;
    // If the rich edit is empty...
    if iLastLine = -1 then
    begin
        // Remove line feeds from the string
        i := pos( #10, s );
        while i <> 0 do
            begin

```

```

    delete( s, i, 1 );
    i := pos( #10, s );
end;
// Remove carriage returns from the string (break lines)
i := pos( #13, s );
while i <> 0 do
begin
    ss := copy( s, 1, i-1 );
    delete( s, 1, i );
    Memo1.Lines.Append( ss );
    i := pos( #13, s );
end;
Memo1.Lines.Append( s );
end
else
begin
    // String to add is : last line added + new one
    s := Memo1.Lines[iLastLine] + s;
    // Remove carriage returns (break lines)
    i := pos( #13, s );
    while i <> 0 do
    begin
        ss := copy( s, 1, i-1 );
        delete( s, 1, i );
        if iLastLine <> -1 then
        begin
            Memo1.Lines[iLastLine] := ss;
            iLastLine := -1;
        end
    end
    else

```

```

        Memo1.Lines.Append( ss );
        i := pos( #13, s );
    end;
    if iLastLine <> -1 then
        Memo1.Lines[iLastLine] := s
    else
        Memo1.Lines.Append( s );
    end;
    //re.Lines.EndUpdate;
    // Scroll incoming text rich edit
    SendMessage( Memo1.Handle, EM_SCROLLCARET, 0, 0 );
    Memo1.Update;
    form1.CommPortDriver2.ContinuePolling;
end;

function HEX2DEC(HEX: ansistring): LONGWORD;
function Digt(Ch: ansiCHAR): BYTE;
const
    HEXDigs: ansistring = '0123456789ABCDEF';
var
    I: integer;
    N: integer;
begin
    N := 0;
    for I := 1 to Length(HEXDigs) do
        if (Ch = HEXDigs[I]) then
            N := I - 1;
        Digt := N;
    end;
const
    HEXSet: set of ansiCHAR = ['0'..'9', 'A'..'F'];

```



```

var
  J: LONGword;
  Error: BOOLEAN;
  DEC: LONGword;
begin
  DEC := 0;
  Error := False;
  for J := 1 to Length(HEX) do
    begin
      if not (UpCase(HEX[J]) in HEXSet) then
        Error := True;
      DEC := DEC + Digt(UpCase(HEX[J])) shl ((Length(HEX) - J) *
4);

      {  $16^N = 2^{(N * 4)}$  }
      {  $N \text{ SHL } ((\text{Length}(\text{HEX}) - J) * 4) = N * 16^{(\text{Length}(\text{HEX}) - J)}$  }
    end;
  if Error then
    HEX2DEC := 0
  else
    HEX2DEC := DEC;
end;

procedure ParseStrT(ss: ansiString; var v1, v2 : Double);
var vs1, vs2: ansiString;
    vv : Single;
    k: integer;
    b : Array [0..3] of byte absolute vv;
begin
  v1:=-1;
  v2:=-1;

```

```

    k:=      Length(ss);
  if (Length(ss)<>25) then exit;
  vs1 := Copy(ss,8,8);
  vs2 := Copy(ss,16,24);
  b[0]:=hex2dec(Copy(vs1,1,2));
  b[1]:=hex2dec(Copy(vs1,3,2));
  b[2]:=hex2dec(Copy(vs1,5,2));
  b[3]:=hex2dec(Copy(vs1,7,2));
  v1 := vv;
  b[0]:=hex2dec(Copy(vs2,1,2));
  b[1]:=hex2dec(Copy(vs2,3,2));
  b[2]:=hex2dec(Copy(vs2,5,2));
  b[3]:=hex2dec(Copy(vs2,7,2));
  v2 := vv;
end;
procedure TForm1.Timer1Timer(Sender: TObject);
var
  Counter,ki,kp,Sp : Single;
  fref : word;
  Tm : Cardinal;
  i : integer;
begin
  Sp :=1.32;
  kp:=2.89*20;
  ki:=0.594*10;
  wref:=StrtoFloat(Form1.Edit1.Text)*0.1;
  ReadRegFlag := 0;
  request_modbus_read(01,03,8501,01);
  while ((ReadRegFlag = 0) and (Now-Time < 1)) do
    begin

```

```

    Application.ProcessMessages;
end;
Tm := Form1.Timer1.Interval;
wz:= wref - temp*Sp;
Sum := Sum + ki*wz*Tm/1000;
fref := Round(70 + Sum+kp*wz*10/6.28);
if fref>500 then fref:=500;
WriteRegFlag := 0;
request_modbus_write(01,06,8502,500);
while ((WriteRegFlag = 0) and (Now-Time < 1)) do
    begin
        Application.ProcessMessages;
    end;
//Chart1.Series[2].AddXY(GlobalTime,fref);
Chart2.Series[0].AddXY(GlobalTime,wz);
Chart2.Series[1].AddXY(GlobalTime,fref/100);
Memo3.Lines.Append('Wz:' + floattostr(wz) + 'fref:' + floatto-
str(fref) + 'Speed:' + floattostr(temp*1.32) + 'Time:' + Intto-
str(GlobalTime));
Form1.Label1.Caption := TimetoStr(Time);
end;
procedure TForm1.Timer2Timer(Sender: TObject);
var
    Tm : Cardinal;
begin
    GlobalTime := GlobalTime+1;
    if checkbox1.Checked then
        CommPortDriver2.SendString('$0001RR000008B1'+chr(13));
    if checkbox1.Checked then
        begin

```

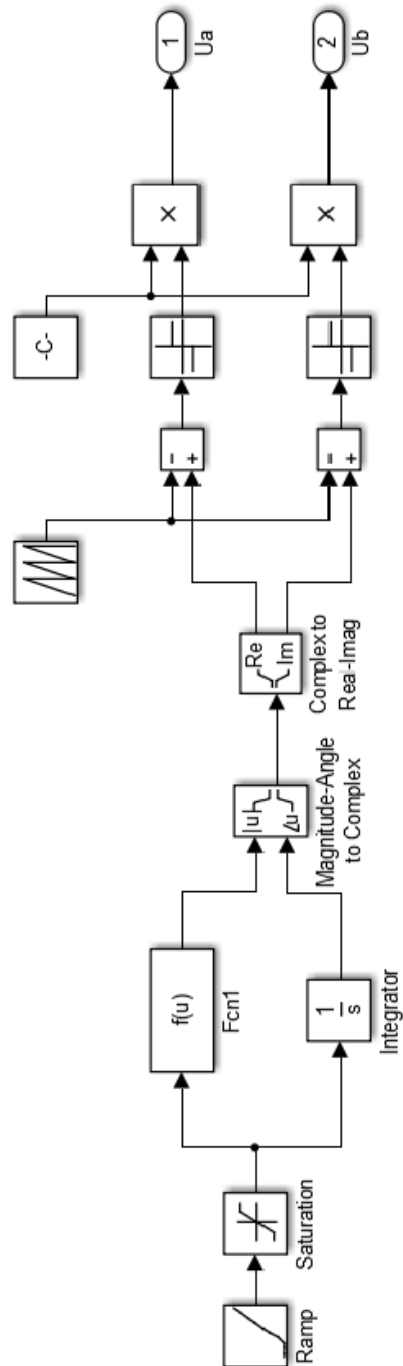
```

try
  if Memo1.Lines.Count>3 then
    begin
      ParseStrT(Memo1.Lines[Memo1.Lines.Count-2],temp,speed);
      Memo2.Lines.Add(FloatToStr(temp)+';'+FloatToStr(temp)+';');
      Chart1.Series[0].AddXY(GlobalTime,temp*1.32);
      // Memo3.Lines.Append('Speed:' + floattostr(temp*1.32));
      //Chart1.Series[1].AddXY(GlobalTime,speed);
    end;
  finally
    end;
  end;
end;
// waiting reference
procedure TForm1.Timer3Timer(Sender: TObject);
begin
  request_modbus_read(01,03,8501,01);
end;
end.

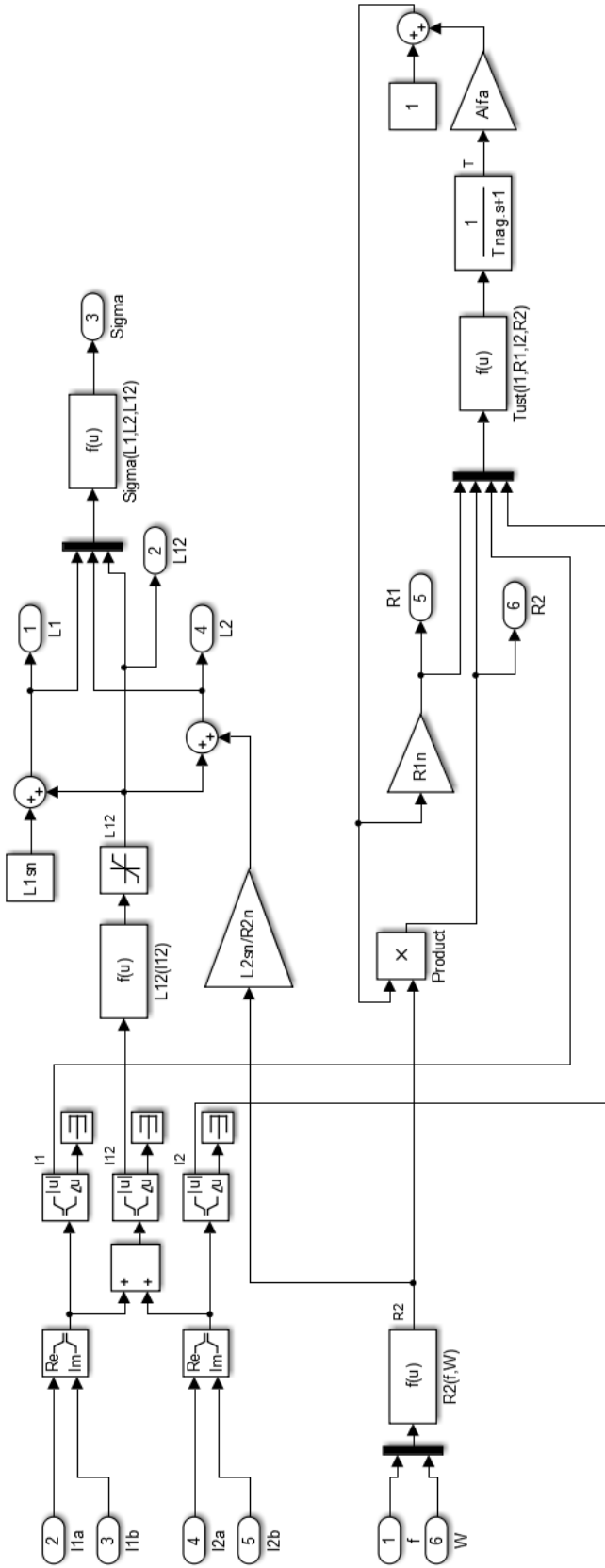
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

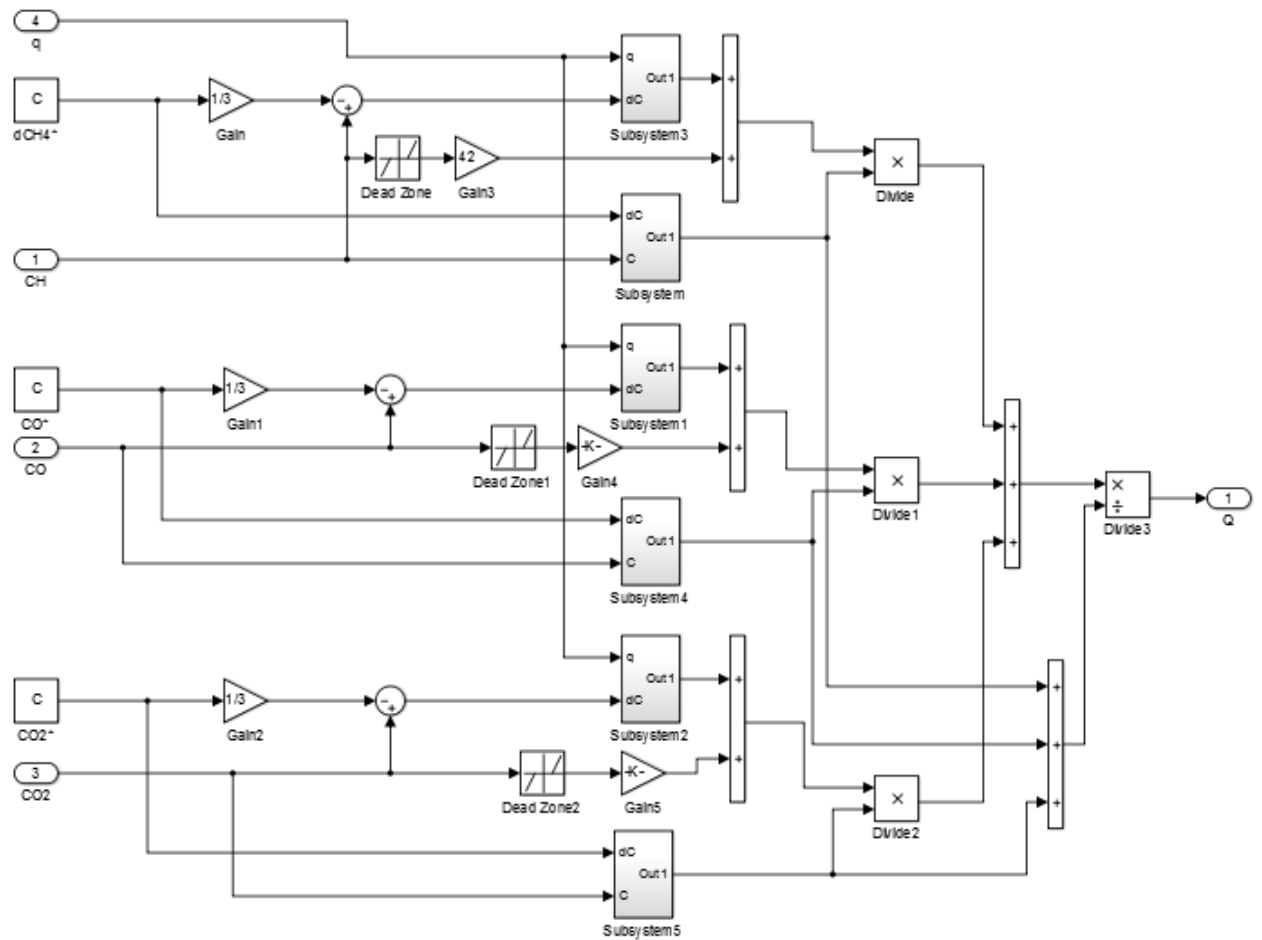
Программные средства моделирования в среде MatLab\Simulink



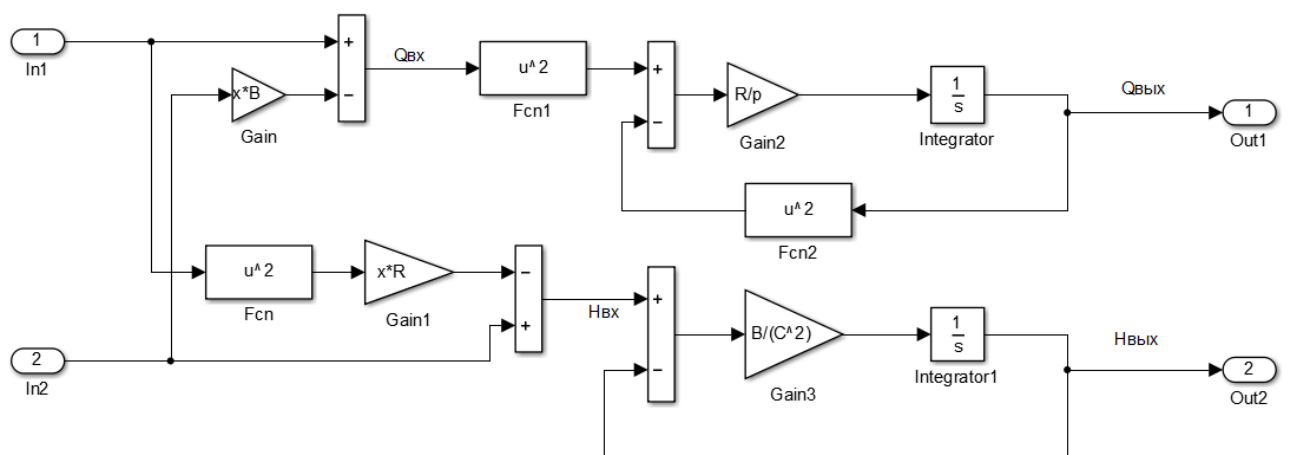
Модель преобразователя частоты в среде MatLab\Simulink



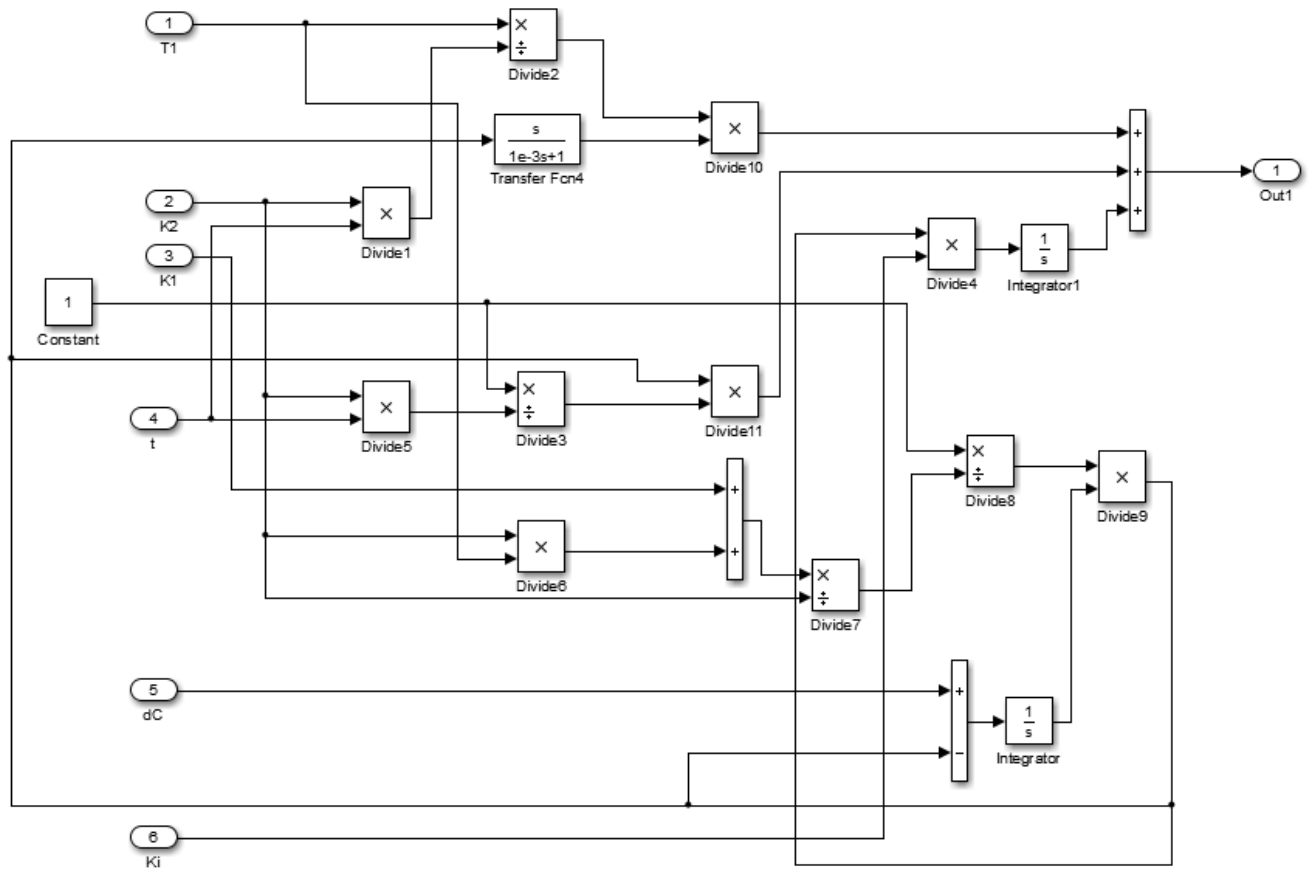
Модель преобразователя частоты в среде MatLab\Simulink



Модель блока взвешивания опасных газов в MatLab\Simulink



Модель элементарного участка вентиляционной сети



Модель регулятора опасных газов в MatLab\Simulink