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»

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

Семыкина Ирина Юрьевна

Официальные оппоненты:

Григорьев Максим Анатольевич доктор технических наук, доцент, ФГБОУ

ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промыш-

ленных установок»

Тимухин Сергей Андреевич доктор технических наук, профессор, ФГБОУ

ВПО «Уральский горный государственный университет», профессор кафедры горной

механики

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный

индустриальный университет»

Защита состоится 19 марта 2015 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (3842) 36-16-87, e-mail: siyu.eva@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте

Sminn

http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/

Автореферат разослан « » февраля 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Захарова Алла Геннадьевна

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 нагнетательным способом 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 частотнорегулируемого 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 воздуховодов. 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 частотно-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 использовании возможностей частотнорегулируемого 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:

- 1. Анализ нормативно-технической документации, научных информационных источников и существующих схемотехнических решений автоматизированного электропривода вентиляторов местного проветривания тупиковых выработок.
- 2. Разработка математической модели и программных средств для системы вентиляции тупиковой выработки с учетом переходных процессов.
- 3. Разработка концепции построения и оригинальных алгоритмов управления для системы частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания, обеспечивающего регулирование состава рудничной атмосферы тупиковой выработки в соответствии с нормативно-технической документацией.
- 4. Проведение вычислительных экспериментов и экспериментальных исследований на физической модели, имитирующей тупиковую выработку для оценки энергетической эффективности электропривода вентиляторов местного проветривания.
- 5. 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 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 «Электромеханические 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 Президента 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 страниц текста, 42 рисунка, 18 таблиц и список литературы из 147 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

В первой главе произведен обзор нормативно-технической документации, регламентирующей работу системы вентиляции тупиковых выработок, научных работ и исследований по этому направлению, а также технических средств.

На основании анализа нормативной документации сформулированы основные требования, которые должны обеспечиваться системой управления проветриванием тупиковой выработки.

В общем, можно сказать, что система управления должна обеспечивать надежную, беспрерывную подачу установленного количества воздуха в выработку для поддержания в пределах установленных Правилами безопасности вредных примесей и газов в атмосфере выработки.

Правила безопасности устанавливают следующие требования к рудничной атмосфере в тупиковых выработках.

Таблица 1. Предельные значения рудничной атмосферы

Контролируемый параметр	Значение
Концентрация метана в призабойном пространстве тупиковой выработки, %	<2
Концентрация метана на исходящей струе тупиковой выработки, %	<1
Запыленность в исходящей струе тупиковой выработки, мг/м ³	<150
Скорость воздуха в призабойном пространстве тупиковой выработки, м/с	0,25 – 4
Концентрация кислорода в выработке, %	>20
Концентрация диоксида углерода в выработке, %	<0,5

Анализ информационных материалов производителей горно-шахтного оборудования показывает, что ни в одной из систем автоматизации аэрогазового контроля, представленных в настоящее время на рынке, не предусмотрено автоматическое регулирование рабочих характеристик ВМП, а функция автоматического контроля и управления работой ВМП сводится к его дистанционному включению и остановке, а также контролю за его состоянием. Для эффективного использования вентиляторных установок в их конструкции предусмотрена система регулирования рабочих характеристик. Регулирование осуществляется изменением угла установки лопаток рабочего колеса направляющего аппарата и изменением сечения входного коллектора. В то же время, управление аэрогазовым режимом в тупиковой выработке путем изменения частоты вращения ВМП энергетически более эффективно по сравнению с регулировками, предусмотренными в конструкции вентилятора.

Преобразователи частоты, представленные на рынке, позволяют в полной мере решить задачи по регулированию производительности ВМП, но для этого должна быть произведена их полная интеграция в системы АГК.

Анализ научных публикаций показал, что проблемы проветривания тупиковых выработок изучаются большим числом ученых уже давно. В настоящее время работы ведутся в направлении изучения газодинамики процессов, происходящих в выработке при различных не штатных ситуациях, таких как внезапные выбросы газа, взрывы. Способы изучения динамических процессов в настоящее базируют-

ся на методах численного моделирования. Наибольшее распространение получил метод конечно-элементного моделирования.

На основании этих научно-исследовательских работ построено математическое описание системы вентиляции, разработаны подходы к структуре электропривода и системе управления электроприводом вентилятора местного проветривания.

Вторя глава посвящена техническому решению задач. Разработана структура системы управления вентилятором местного проветривания, предложен конструктив системы управления, разработано математическое описание системы вентиляции тупиковой выработки, программное средство, производится настройка системы управления.

В работе рассмотрен нагнетательный способ проветривания тупиковой выработки, схематически показанный на рисунке 1, при котором нормальный состав рудничной атмосферы поддерживается вентилятором местного проветривания, оснащенным частотно-регулируемым электроприводом.

Согласно нормам Правил безопасности для контроля качества рудничной атмосферы в воздуховоде, непосредственно в призабойном пространстве и на исходящей струе тупиковой выработки устанавливаются датчики системы аэрогазового контроля, контролирующие содержание вредных примесей, в частности анемометр для контроля скорости воздушного потока на выходе вентиляционной сети $V_{\rm BMX}$ и газоанализаторы, определяющие содержания углекислого газа CO2, угарного газа CO и метана CH4. 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, общая структура которой показана на рисунке 2, где $\mathrm{EP}-\mathrm{бло}\kappa$ регуляторов; $\mathrm{\Pi Y}-\mathrm{преобразователь}$ частоты; $\mathrm{BC}-\mathrm{вентиляционная}$ сеть. Структура системы автоматического управления иерархическая. Во внутреннем контуре за счет изменения потока воздуха Q_{BX} на входе ВМП посредством регулирования частоты f подводимого κ двигателю напряжения по заданию f^* для преобразователя частоты поток Q_{BMX} поддерживается на заданном уровне Q^*_{BMX} . Величина Q_{BMX} определяется косвенно по V_{BMX} , регулирование осуществляется по отклонению с применением пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора.

Внешний контур регулирования организован по принципу нахождения минимально достаточного задания потока $Q^*_{\rm BЫX}$ для разбавления вредных примесей, где в качестве задающих воздействий используются допустимые диапазоны концентраций вредных газов $dC^*_{\rm CH4}$, $dC^*_{\rm CO}$ и $dC^*_{\rm CO2}$, а обратные связи организованы по показаниям газоанализаторов в забое C_3 (концентрация CH4, CO и CO2) и на исходящей струе $C_{\rm II}$ (концентрация CH4). Структура внешнего контура регулирования показана на рисунке 3.

Для каждого газа (CH4, CO и CO2) 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 выходно-

му 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 ($Q^*_{\rm CH4}, Q^*_{\rm CO}$ и $Q^*_{\rm CO2}$).

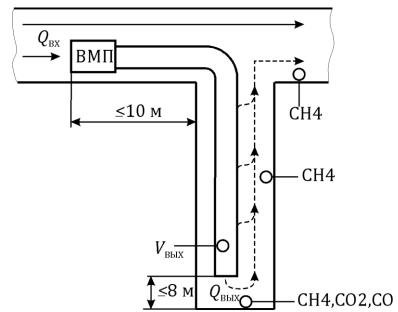


Рисунок 1. Схема проветривания тупиковой выработки

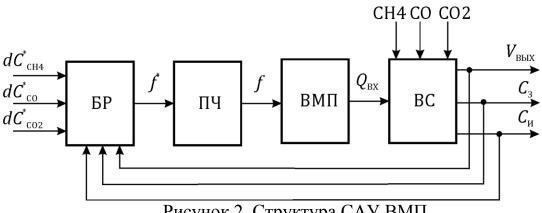


Рисунок 2. Структура САУ ВМП

Величины Q^*_{Γ} , где Γ – индекс, обозначающий тип газа: CH4, CO2 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 метод взвешивания, где весовой коэффициент каждого задания потока воздуха определяется в блоке взвешивания (БВ) по степени близости концентрации газа к границе допустимого диапазона:

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

Итоговое значение $Q^*_{\rm BMX}$ определяется формирователем задания (ФЗ) по среднегеометрическому принципу:

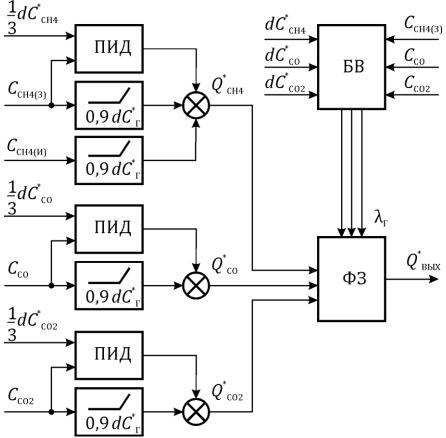


Рисунок 3. Структура внешнего контура регулирования

$$Q^*_{\mathrm{BbIX}} = \frac{Q^*_{\mathrm{CH4}} \cdot \lambda_{\mathrm{CH4}} + Q^*_{\mathrm{CO}} \cdot \lambda_{\mathrm{CO}} + Q^*_{\mathrm{CO2}} \cdot \lambda_{\mathrm{CO2}}}{\lambda_{\mathrm{CH4}} + \lambda_{\mathrm{CO}} + \lambda_{\mathrm{CO2}}}.$$

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

Реализация системы управления ВМП возможна на базе серийно выпускаемых преобразователей частоты, предназначенных для регулирования производительности ВМП, это частотный преобразователь вентилятора проветривания ЧПВП производства ООО «Электромашина» и блок частотного регулирования для вентиляторов местного проветривания БЧРВ—30 производства НПО «Аэросфера». Эти преобразователи уже имеют в своей структуре ПЛК, требуемый для реализации алгоритмов управления, и линии связи для полной интеграции в системы АГК.

Системы АГК, представленные на рынке горно-шахтного оборудования в полной мере обеспечивают все условия для их объединения с системой управления вентилятором местного проветривания.

Следовательно, все технические средства для создания системы автоматизированного управления производительностью вентилятора местного проветривания имеются, необходимо внести дополнения в нормативно-техническую документацию, регулирующую деятельность горного предприятия.

Электрический привод вентилятора местного проветривания оснащен асинхронным электродвигателем. Математическая модель АД, выраженная через потокосцепления двигателя в неподвижной системе координат α - β . Данная модель записывается следующим образом:

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

где $u_{l\alpha}$, $u_{l\beta}$ — составляющие по осям неподвижной системы координат (α, β) вектора подводимого к статору напряжения; $\Psi_{l\alpha}$, $\Psi_{l\beta}$, $\Psi_{2\alpha}$, $\Psi_{2\beta}$ — составляющие векторов потокосцеплений статора и ротора соответственно; R_{l} , R_{2} — активные сопротивления статора и ротора соответственно; L_{l} , L_{2} — индуктивности обмоток статора и ротора соответственно; L_{m} — взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; ω — угловая скорость вала двигателя; p — число пар полюсов; σ — коэффициент рассеяния.

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 одномассовой 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.

Математическая модель приводного асинхронного электродвигателя составлена с учетом того, что активные сопротивления и индуктивности — переменные величины, рассматриваемые как внутренние возмущения. Индуктивности изменяются в связи с насыщением, а активные сопротивления — в связи с вытеснением тока и нагревом.

Вентилятор представляется нелинейным элементом, преобразующим угловую скорость двигателя, т. е. скорость вращения вентилятора, в его подачу $Q_{\rm B}$. Данная зависимость получена по статическим характеристикам вентилятора.

$$Q_{\scriptscriptstyle B}(\omega) = k\omega^2$$
,

где k — коэффициент передачи, зависящий от характеристик сети, на которую работает вентилятор.

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

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

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 разбивалась на интервалы по длине, численно равные длине стандартной секции воздуховода.

Процесс перемешивания газа описывается уравнением конвективно - турбулентной диффузии:

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

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

По полученному математическому описанию была произведена настройка системы управления. 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, переходные процессы системы ВМП – ВС достаточно точно аппроксимируются инерционным звеном второго порядка с запаздыванием, параметры которого можно определить по опыту запуска.

Исходя из этого, для настройки регуляторов САУ была произведена идентификация системы $\Pi \mathbf{U} - \mathbf{B} \mathbf{M} \mathbf{\Pi} - \mathbf{B} \mathbf{C}$ как объекта управления при ступенчатом задании управляющего воздействия различной интенсивности. В ходе идентификации система $\Pi \mathbf{U} - \mathbf{B} \mathbf{M} \mathbf{\Pi} - \mathbf{B} \mathbf{C}$ описана передаточной функцией:

$$W_{Q}(p) = \frac{k}{T_{1}T_{2}p^{2} + (T_{1} + T_{2})p + 1} \cdot e^{-T_{3}p}$$

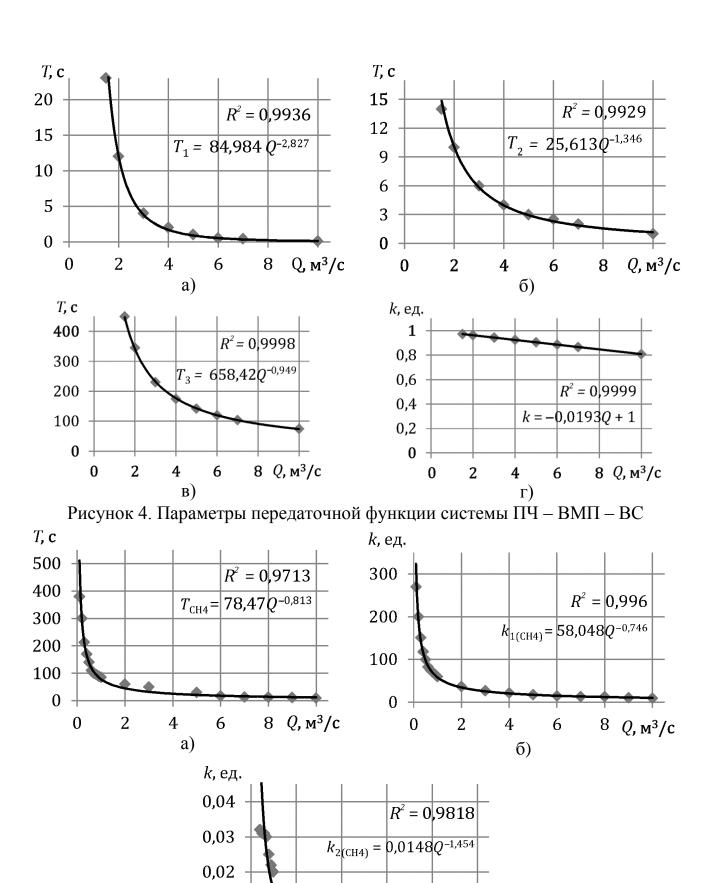
где T_I , T_2 , T_3 — постоянные времени; k — коэффициент усиления, а каждый из параметров имеет нелинейную зависимость от заданного потока воздуха на выходе вентиляционной сети $Q^*_{\rm BbIX}$, которая приведена на рисунке 4.

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

$$W_{\text{CH4}}(p) = \frac{k_{1(\text{CH4})}}{T_{\text{CH4}} \cdot p + 1} + \frac{k_{2(\text{CH4})}}{p}$$

где T_{CH4} — постоянная времени, $k_{I(CH4)}$, $k_{2(CH4)}$ — коэффициенты усиления, а их зависимость от потока воздуха приведена на рисунке 5.

Для других опасных газов структура передаточной функции идентична передаточной функции, описывающей изменение концентрации метана, а зависимости соответствующих параметров описываются следующими уравнениями.



в) Рисунок 5. Параметры передаточной функции по метану

Q, M^3/c

0,01

Для СО: $T_{\mathrm{CO}} = 103,84Q^{-1,081}; \ k_{\mathrm{I(CO)}} = 84,769Q^{-0,904}; \ k_{\mathrm{2(CO)}} = 0,0003Q^{-1,833}.$ Для СО2: $T_{\mathrm{CO2}} = 144,38 \cdot Q^{-0,867}; \ k_{\mathrm{I(CO2)}} = 4,1946Q^{-1,296}; \ k_{\mathrm{2(CO2)}} = 0,00005Q^{-2,146}.$

По итогам идентификации рассмотренных объектов управления произведена настройка регуляторов на технический оптимум, в результате которой получены адаптивные по управляющему воздействию регулятор потока воздуха $W_Q(p)$ и регуляторы $W_{\Gamma}(p)$ концентрации каждого опасного газа (CH4, CO и CO2), структура которых формируется методом параметрирования стандартного промышленного ПИД регулятора с входным фильтром:

$$W_{Q}(p) = \frac{T_{1}T_{3} + T_{2}T_{3} + T_{1}T_{3}}{kT} \cdot p + \frac{T_{1} + T_{2} + T_{3}}{kT} + \frac{1}{kT \cdot p};$$

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

где T – выбранная инерционность регулятора.

Программное средство разработано по математическому описанию в среде MatLab\Simulink, которое включает в себя модель асинхронного электродвигателя, вентилятора местного проветривания, вентиляционную сеть, призабойное пространство и источник опасных газов.

В третьей главе произведен вычислительный и практический эксперимент, обработаны и сопоставлены результаты экспериментов.

Вначале была проведена оценка энергетической эффективности. Для ее сравнения произведено моделирование способов запуска ВМП, рекомендованных Правилами безопасности. Результаты моделирования приведены на рисунке 6. При этом плавный пуск при использовании ПЧ реализован для законов частотного управления U/f = const и $M_{\rm K}(\omega)/M_{\rm C}(\omega) = const$, где $M_{\rm K}$ — максимальный вращающий момент (критический момент) АД.

При моделировании использовались параметры запуска, обеспечивающие близкое по длительности заполнение воздуховода. Для способа 2 время пуска задано 37 с, а для способа 1 задана следующая длительность импульсов: 1 импульс -1.5 c; 2-2 c; 3-3 c; 4-3 c; 5-3 c, интервал между импульсами -6 c.

По графику $W_{nолн}(t)$ 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 (рис. 6, г). 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.

Полезная энергия при частотных способах выше, так как на низких угловых скоростях момент сопротивления невелик и увеличивается по мере разгона, а за-

коны частотного управления обеспечивают сообразное 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 (рис. 6, е).

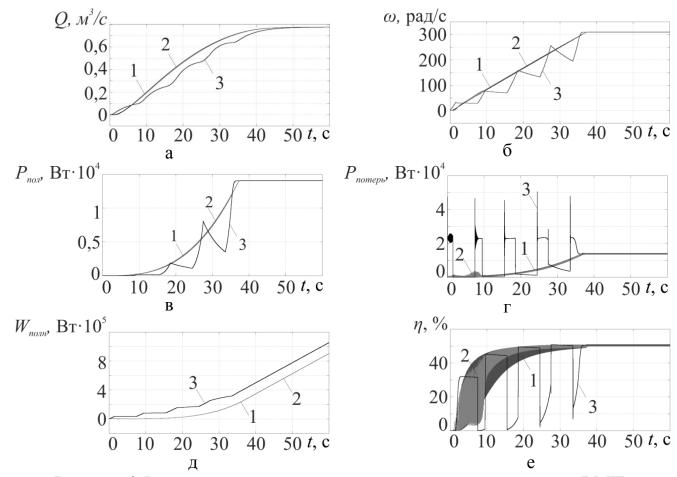


Рисунок 6. Результаты моделирования различных режимов пуска ВМП $1 - U/f = const; 2 - M_{\kappa}(\omega)/M_{\rm C}(\omega) = const; 3$ – импульсный пуск

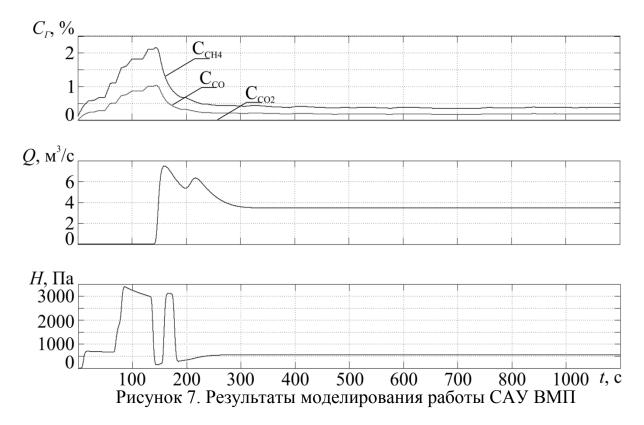
Рассмотренные варианты частотного запуска ВМП обладают близкими энергетическими характеристиками. Однако следует отметить, что в общем случае для вентиляторной нагрузки закон частотного управления U/f=const формирует несколько больший электромагнитный момент на низких угловых скоростях, чем это требуется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

Анализ энергопотребления при различных характеристиках вентиляционной сети и режимах работы ВМП ВМЭ-6 показал, что потребляемая во время работы энергия изменяется в пределах от 36,7 до 27,9 кВт. При работе на нормальной характеристике 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. Следует отметить, что общий уровень энергопотребления в существенно более широких пределах меняется при регулировании производительности вентиля-

тора 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 16,45 кВт.

Основываясь на данных системы АГК наибольшее метановыеделение в тупиковой выработке происходит во время работы проходческой бригады. Если принять что работы ведутся 24 часа в сутки в 4 смены, из которых одна смена ремонтная, то работа ВМП с рассчитанной в проекте выработки производительностью для обеспечения безопасных условий приходится приблизительно на 16 часов в сутки, остальное время ВМП работает с избыточной производительностью, составляющей порядка 40%. В денежном эквиваленте это соответствует 158000 рублей в год. Таким образом, при применение системы частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания для регулирования его производительности, помимо повышения эксплуатационной надежности вентиляционных сооружений, дает возможность снизить энергопотребление вентиляционной установки, а также приблизить условия труда к более комфортным, тем самым повысив производительность горнорабочих, не снижая при этом безопасность ведения работ. Все это в совокупности дает срок окупаемости системы не более трех лет.

На следующем этапе для анализа эффективности работы предложенной системы автоматизированного управления ВМП и правильности настройки регуляторов было проведено моделирование работы системы регулирования опасных газов. Результаты представлены на рисунке 7.



В ходе моделирования установлено, что по окончанию запуска ВМП, концентрация ни по одному из газов C_{Γ} не превысила dC_{Γ}^* , что позволяет сделать вывод об эффективности предлагаемой САУ. Заниженное относительно одной трети от dC_{Γ}^* значение концентраций опасных газов объясняется ограничением снизу величины Q_{BMX}^* для обеспечения требуемой минимальной скорости воздушного потока в выработке V_{BMX} . 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.

Для проверки адекватности математической модели и определения степени достоверности полученных результатов моделирования был произведен физический эксперимент. Экспериментальные исследования выполнялись на физической модели вентиляционной системы (рисунок 8), 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».

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 TTM-2-01 и откуда после обработки с помощью специально написанной программы данные передавались на аналогичный интерфейс связи преобразователя частоты.



Рисунок 8. Экспериментальная установка

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 $Q^*_{\rm BbIX}$, ступенчато задаваемым в начале эксперимента. Переходные процессы потока воздуха, полученные для физической и компьютерной модели, показаны на рисунках 9 и 10 соответственно.

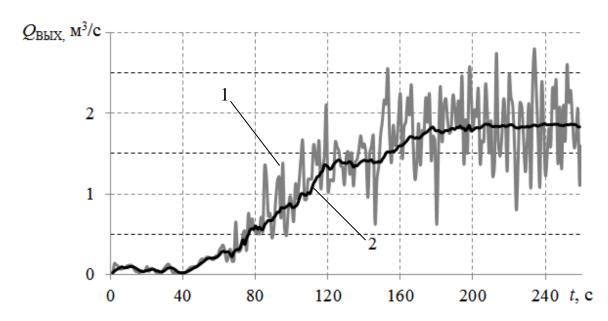


Рисунок 9. Результаты эксперимента: 1) Q_{BblX} с шумами измерения; 2) Q_{BblX} после фильтрации методом скользящего среднего

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.

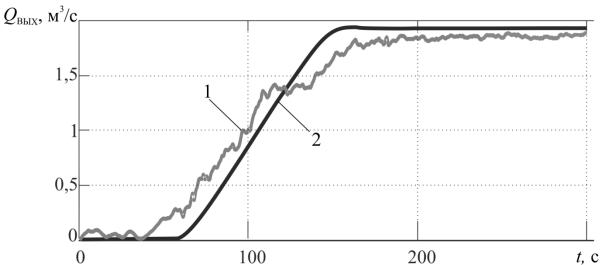


Рисунок 10. Результаты моделирования — поток Q_{BMX} воздуха на выходе вентиляционной сети: 1) экспериментальные данные; 2) данные модели

Таким образом, применение автоматизированной системы частотного регулирования параметров атмосферы тупиковой выработки обеспечит повышение безопасности ведения горных работ, с точки зрения требований к составу руднич-

ной атмосферы, позволит понизить энергопотребление, а также снизит динамические нагрузки как на электропривод вентилятора, так и на вентиляционную сеть.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальных задач по поддержанию параметров рудничной атмосферы тупиковой выработки в пределах, установленных Правилами безопасности, посредством регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания, и повышению 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. Установлено, что применяемые на практике системы электропривода вентиляторов местного проветривания тупиковых выработок не обеспечивают энергетически эффективное регулирование производительности вентилятора, но, с использованием существующих технических решений, средствами системы управления может быть обеспечено повышение энергетической эффективности вентиляторов местного проветривания при соответствии состава рудничной атмосферы требованиям Правил безопасности в угольных шахтах.
- 2. Разработана математическая модель, включающая призабойное пространство, вентиляционную сеть, вентилятор местного проветривания и управляющий преобразователь частоты, которая позволяет производить оценку энергетической эффективности и состава рудничной атмосферы при работе системы местной вентиляции тупиковой выработки с учетом протекающих в ней переходных процессов.
- 3. Предложена система многокритериального управления частотнорегулируемым электроприводом вентилятора местного проветривания, построенная на основе метода взвешивания. Предложенная система обеспечивает поддержание концентрации опасных газов в составе рудничной атмосферы в пределах допустимых диапазонов их концентрации, а также снижение энергопотребления вентилятора. Для рассматриваемого вентилятора ВМЭ-6 снижение энергопотребления составляет от 2,6 до 16,45 кВт, а срок окупаемости системы автоматического регулирования производительности вентилятора не превышает три года.
- 4. Проведены вычислительные эксперименты и экспериментальные исследования на физической модели, которые подтвердили адекватность используемого математического описания системы вентиляции с погрешностью, не превышающей 15 %.
- 5. 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1. 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.
- 2. Маслов И.П. Концепция системы управления вентилятором местного проветривания угольных шахт / И.П. Маслов, И.Ю. Семыкина // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VI международной научнотехнической конференции, 9-11 октября 2013. Томск: ТПУ, 2013. С. 122-126.
- 3. Маслов И.П. Обеспечение безопасности горных работ в угольных шахтах при проведении тупиковых выработок средствами вентиляторов местного проветривания / И.П. Маслов, И.Ю. Семыкина // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Материалы X Международной научно-практической конференции, 28-29 ноября 2013 г. Кемерово: КузГТУ, 2013. С. 117-123.
- 4. 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. ОВ № 9. С 3-12.
- 5. Маслов И.П. Управление шахтным вентилятором местного проветривания в автоматическом режиме / И.П. Маслов, И.Ю. Семыкина, А.В. Киселев // Автоматизация в промышленности. 2014. N = 10. C.43-45.
- 6. 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.
- 7. 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.
- 8. Маслов И.П. Экспериментальное исследование работы адаптивной системы управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом вентилятора местного проветривания / И.П. Маслов, И.Ю. Семыкина // І Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». Кемерово: КузГТУ, 2014. С. 96-101.